M25

MINISTÈRE DES RICHESSES NATURELLES

L'HONORABLE PAUL-E. ALLARD
MINISTRE

PAUL-ÉMILE AUGER
SOUS-MINISTRE

NUAGES ET PRÉCIPITATIONS

PAR
RAYMOND GAGNON, M.SC., RAYMOND PERRIER, M.A.
ET G.-OSCAR VILLENEUVE, PH.D.

QUÉBEC
1966

Prix: $1.00

M-25

105-05535/

MINISTÈRE DES RICHESSES NATURELLES DU QUÉBEC

L'HONORABLE PAUL-E. ALLARD
MINISTRE

PAUL-ÉMILE AUGER
SOUS-MINISTRE

SERVICE DE MÉTÉOROLOGIE

G.-OSCAR VILLENEUVE, DIRECTEUR

NUAGES ET PRÉCIPITATIONS

PAR

RAYMOND GAGNON, M.SC., RAYMOND PERRIER, M.A.
ET G.-OSCAR VILLENEUVE, PH.D.

QUÉBEC
1968

Prix: $1.00

M-25

TABLE DES MATIERES

Page

I - INTRODUCTION..... 1

II - FORMATION DES NUAGES..... 2

A) Le phénomène de la condensation..... 3

B) La "chambre de Wilson"..... 6

C) Les noyaux de condensation..... 7

D) Le rôle du sel marin..... 8

E) Comportement des noyaux de condensation..... 11

F) Dimensions des noyaux de condensation..... 13

III - CLASSIFICATION DES NUAGES..... 14

A) Historique..... 14

B) Nuage, brouillard et brume..... 15

C) Familles de nuages..... 16

D) Définition et description des nuages..... 17

I - CIRRUS..... 17
II - CIRROCUMULUS..... 25
III - CIRROSTRATUS..... 28
IV - ALTOCUMULUS..... 29
V - ALTOSTRATUS..... 41

VI - STRATOCUMULUS..... 52
VII - STRATUS..... 60
VIII - NIMBOSTRATUS..... 70
IX - CUMULUS..... 70
X - CUMULONIMBUS..... 82

E) Photographies..... 94

F) Nébulosité..... 96

IV - FORMATION DE LA PRECIPITATION..... 96

A) Croissance des gouttelettes..... 97

B) Condensation sélective de la vapeur d'eau..... 100

C) Coalescence..... 104

D) Importance relative des mécanismes d'accroissement.... 104

E) Apport d'humidité..... 107

V - SOMMAIRE ET CONCLUSIONS..... 109

VI - REFERENCES..... 109

I - INTRODUCTION

D'où viennent les nuages? Comment les identifier? Pourquoi donnent-ils des précipitations? C'est à ces questions que nous voulons répondre en donnant suite aux demandes exprimées à maintes reprises dans le passé par les observateurs des stations météorologiques, les naturalistes, les étudiants et même de nombreux professeurs.

L'origine de l'intérêt que l'homme porte aux systèmes nuageux se perd dans la nuit des temps. Marins, bergers et guides de caravanes furent probablement les premiers météorologues. Bien qu'ignorant tout des mécanismes de formation des nuages, ils savaient prédire le temps en associant les diverses formes des nuages aux conditions météorologiques.

Observer les nuages est un passe-temps instructif et peu dispendieux. L'atmosphère constitue un merveilleux laboratoire où s'élaborent et se concrétisent chaque jour de nouvelles formations de nuages. Les observateurs de stations météorologiques d'une part, en sont persuadés, intéressés qu'ils sont à prendre note chaque jour de ce qui se passe dans le ciel. Les jeunes scientifiques, les naturalistes, les membres de clubs 4-H ou de camps de vacances d'autre part, s'adonnent aux observations de l'atmosphère et ont la possibilité d'identifier et de noter les formes variées des nuages, d'étudier leur évolution et de les relier si possible à d'autres phénomènes météorologiques pour tirer de ces observations des renseignements

précieux sur le comportement du temps.

Pour toutes ces raisons, il est donc normal que nous présentions un bulletin qui explique la formation des nuages, décrive les genres, espèces ou variétés universellement reconnus et donne un aperçu de l'origine des précipitations.

II - FORMATION DES NUAGES

Les nuages exercent sur l'homme éveillé aux phénomènes naturels, une forte attirance. Nous avons tous admiré, par un bel après-midi d'été, les bourgeonnements des Cumulus ou les formes fibreuses et changeantes des Cirrus. Certains nuages ne semblent exister que pour décorer le firmament, tels les Cirrus ou les Cumulus de beau temps. D'autres, comme les Cumulonimbus, à cause de leurs déploiements spectaculaires, commandent toujours le respect de l'homme (9, 10, 15).

D'où viennent les nuages? De quoi sont-ils faits? Comment prennent-ils naissance? A l'école élémentaire, on nous a dit que l'air contient de la vapeur d'eau, que cette vapeur se transforme en fines gouttelettes par condensation et que les nuages sont des amas de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air.

Sans doute, cette explication suffit à satisfaire temporairement la curiosité, mais on désire plus tard approfondir le phénomène de la condensation, expliquer les formes variées des nuages, savoir pourquoi certains nuages donnent de la pluie, de la neige ou de la grêle, tandis que d'autres ne laissent tomber aucune précipitation (5).

A) Le phénomène de la condensation

Pour aborder simplement le phénomène de la condensation, pensons à une expérience que nous avons tous vécue, celle de la formation d'une buée sur un verre d'eau par une journée chaude et humide.

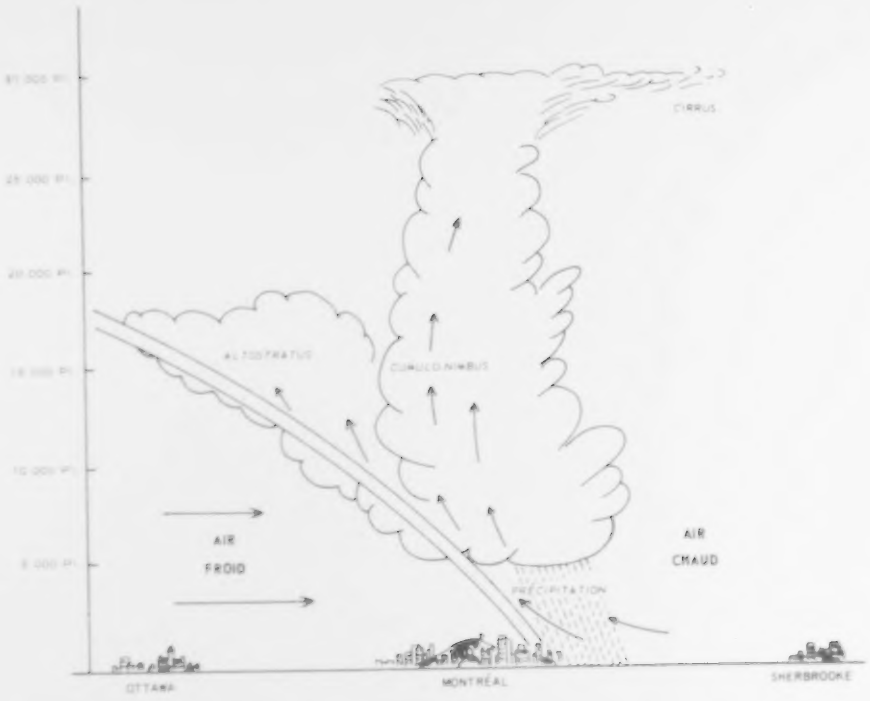
Disons qu'il fait 80 degrés Fahrenheit, que l'humidité relative de l'air est de 80 pour cent et que nous tenons en main un verre d'eau glacée. L'air venant en contact avec le verre a une température voisine de 32 degrés F. A cause du refroidissement, l'humidité relative de l'air augmente aux abords immédiats du verre. Il vient un moment où l'air refroidi est saturé de vapeur d'eau; une buée apparaît alors sur la paroi du verre, suivie de la formation de gouttelettes d'eau.

Dans l'atmosphère, il n'existe rien pouvant jouer le rôle de la paroi du verre de notre exemple pour amener la saturation de la vapeur d'eau. Le refroidissement nécessaire à la saturation se produit autrement. Ordinairement, l'air humide est soulevé dans l'atmosphère par une surface frontale (Fig. 1) ou par un réchauffement à la surface du sol. Au cours de son ascension, l'air se refroidit par détente adiabatique. En effet, si nous suivons une parcelle d'air dans son mouvement ascensionnel, nous pouvons constater que la pression atmosphérique qui s'exerce sur elle diminue constamment. La parcelle d'air occupe un volume de plus en plus grand et se refroidit par expansion. Le refroidissement contribue à faire augmenter graduellement l'humidité relative de l'air jusqu'au moment où celle-ci atteint 100 pour cent. L'air est alors saturé d'eau et nous observons un début de

Figure 1. - SOULEVEMENT FRONTAL

Cette coupe verticale montre le soulèvement de l'air causé par l'avance d'un front froid se déplaçant rapidement vers l'est. La masse d'air froide agit comme un coin qui se glisse sous l'air chaud, et le soulève, provoquant la formation des nuages indiqués.

L'échelle verticale est fortement exagérée par rapport à l'échelle horizontale.


CIRRUS
ALTOSTRATUS
CUMULONIMBUS
AIR
FROID
AIR
CHAUD
PRÉCIPITATION
OTTAWA
MONTRÉAL
SHERBROOKE

condensation: c'est la formation du nuage qui s'amorce.

B) La "chambre de Wilson"

Au cours de ses recherches sur l'atmosphère, vers 1890, Charles Thompson Rees Wilson, physicien écossais (1869-1960) mit au point la "chambre de condensation", celle-là même qui devait jouer plus tard un rôle important comme détecteur de particules atomiques. Cette chambre était conçue pour répéter en vase clos les phénomènes de condensation et de formation des nuages. Ainsi, par expansion rapide de l'air dans la chambre de condensation, le physicien pouvait faire apparaître à volonté de petits nuages, contrôler les conditions d'expansion et mesurer diverses caractéristiques de l'air dans la chambre. Mais, en 1897, Wilson eut l'idée d'introduire dans sa chambre de condensation de l'air humide mais filtré, donc débarrassé de toutes impuretés.

En diminuant la pression dans la chambre, il s'aperçut que l'air humide pouvait dépasser le point de saturation sans qu'il y ait formation de nuage. En fait, l'humidité relative de l'air pouvait augmenter jusqu'à des valeurs de l'ordre de 800 pour cent sans que se produise la condensation. Wilson découvrit qu'un nuage de condensation se produisait finalement lorsque l'humidité relative atteignait des valeurs supérieures à 800 pour cent. Il expliqua cette condensation spontanée par l'agglomération des molécules d'eau, agglomération qui se trouve favorisée par des fluctuations microscopiques de densité dans la vapeur d'eau. Ces fluctuations prennent naissance lorsque l'humidité relative est très élevée.

C) Les noyaux de condensation

La découverte était d'importance. On savait bien que l'humidité de l'air ambiant n'atteint jamais des valeurs aussi hautes que 800 pour cent. Tout au plus atteint-elle occasionnellement 100 pour cent. Et pourtant la vapeur d'eau atmosphérique se condense et forme des nuages jour après jour. C'est que l'air que nous respirons est loin d'être pur. En effet, il contient en quantités phénoménales de fines particules en suspension sur lesquelles la vapeur d'eau vient se condenser. Ces particules qu'on a appelées "noyaux de condensation" servent d'amorce et permettent aux molécules d'eau de s'agglomérer et de former de fines gouttelettes d'eau à peu près au point de saturation de la vapeur d'eau. Ces minuscules noyaux jouent le rôle que jouait la paroi froide du verre d'eau glacée dans l'exemple donné plus haut.

Ces particules sont solides pour la plupart. Ainsi, chaque fois qu'il y a combustion, les fumées qui s'élèvent dans l'atmosphère contiennent un nombre considérable de noyaux de condensation. Les fumées des villes, celles des feux de forêt, celles des volcans fournissent une bonne partie des noyaux présents dans l'atmosphère. Le tableau ci-après donne une idée du nombre astronomique de particules présentes dans l'atmosphère (8).

PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'AIR

TYPE DE LOCALITE	NOMBRE DE PARTICULES (par centimètre cube)
Cité	150,000
Ville	35,000
Campagne	10,000
Montagne < 1,000 mètres	6,000
Montagne 1,000 - 2,000 mètres	2,100
Montagne > 2,000 mètres	1,000
Océan	1,000

La pollution de l'air au-dessus des grands centres a atteint les proportions d'un problème majeur et l'on pourrait se demander si, avec l'accroissement constant des sources de pollution, nous n'allons pas augmenter les nuages au-dessus de nos têtes jusqu'à nous cacher la présence du soleil. En réalité, sur l'ensemble du globe, on n'observe pas de changement appréciable de la nébulosité depuis plusieurs décennies. L'atmosphère des villes est cependant à tel point polluéeque l'on observe fréquemment au-dessus des grands centres un "dôme de fin brouillard" qui représente un danger pour la santé humaine. L'augmentation considérable de "noyaux de condensation" au-dessus des villes est responsable de ce brouillard.

D) Le rôle du sel marin

Il existe divers types de "noyaux de condensation" et les meilleurs, c'est-à-dire les plus efficaces sont ceux qui ont une grande affinité pour les molécules d'eau. Les noyaux de nature hygroscopique, c'est-à-dire ceux qui absorbent facilement les molécules d'eau, peuvent croître et devenir des gouttelettes à des valeurs d'humidité inférieures à 100 pour cent. Nous savons que le sel, par exemple, absorbe facilement de la vapeur d'eau. Il est probable que vous vous en êtes rendu compte par une journée d'été chaude et humide alors que vous avez essayé de saler vos aliments. Les grains de sel absorbent suffisamment de molécules d'eau et s'agglomèrent au point de ne plus passer par les trous de la salière.

Or, il existe dans l'atmosphère des noyaux de condensation formés de grains de sel. C'est Kinch qui, vers 1890, découvrit la

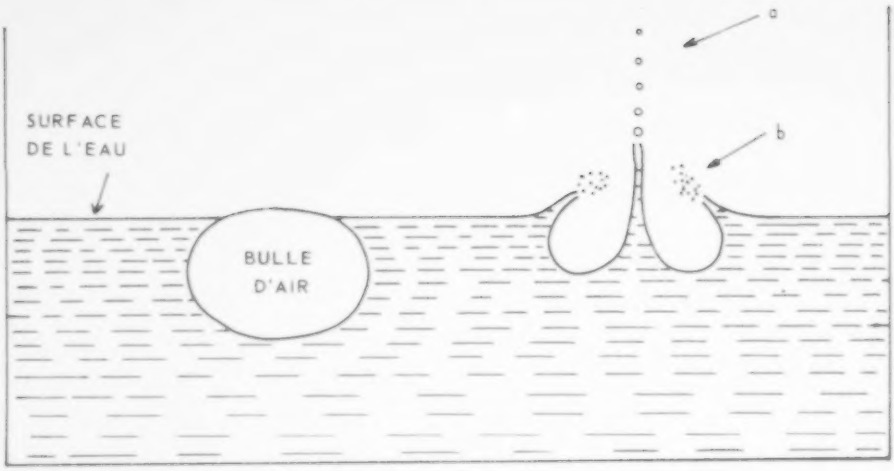


Figure 2. - FORMATION DES NOYAUX DE SEL MARIN lors de l'éclatement des bulles d'air

a) Gouttelettes de saumure formées lors de la désintégration du minuscule jet d'eau (5 à 10 par jet).

b) Particules beaucoup plus nombreuses mais aussi beaucoup plus petites formées par l'éclatement de la "membrane" superficielle de la bulle.

(D'après Mason)

présence de chlore dans l'eau de pluie et avança l'hypothèse de la présence de sel marin dans l'atmosphère. Tout le long des continents et à la grandeur des océans, les vagues déferlent en formations continuellement renouvelées. Les vagues se brisent sur elles-mêmes ou viennent se briser sur les côtes. On peut observer les jets d'eau et d'écume que les vagues projettent dans l'air lorsqu'elles frappent une berge rocheuse. L'eau ainsi projetée dans l'air ne retourne à l'océan qu'en partie. De fines gouttelettes d'eau salée sont transportées par les courants aériens et s'évaporent rapidement. En s'évaporant, elles laissent dans l'atmosphère des particules de sel de dimensions microscopiques (quelques microns)* qui, transportées à des milles de distance, servent plus tard à la formation des nuages et de la pluie (8).

Récemment, des chercheurs ont découvert un processus naturel de formation de noyaux de sel marin encore plus important que celui que nous venons de décrire. L'éclatement de bulles d'air à la surface de l'eau salée est responsable de la formation de la majeure partie des noyaux de sel marin dans l'atmosphère. Le schéma de la figure 2 montre comment l'éclatement d'une bulle d'air à la surface de l'eau crée un minuscule jet d'eau qui projette dans l'air de cinq à 10 gouttelettes. Après leur formation, ces gouttelettes d'eau salée diminuent de volume par évaporation et deviennent suffisamment petites pour être transportées par les courants aériens. Woodcock a d'ailleurs réussi à photographier le phénomène à l'aide d'une cinécaméra extrêmement rapide (3,000 images-seconde).

---

* un micron vaut un dix-millième de centimètre ou 10^{-4} cm.

Ce mécanisme de formation de noyaux de sel marin peut sembler anodin. Pour donner une idée de son efficacité, disons simplement qu'à la suite d'une tempête qui avait persisté pendant trois jours sur la mer Adriatique, on releva la présence d'une couche de sel marin d'un millimètre et demi d'épaisseur sur une superficie de 8,000 kilomètres carrés dans le nord de l'Italie (8).

E) Comportement des noyaux de condensation

Mais pourquoi faut-il des noyaux pour amorcer la condensation? En réalité, les noyaux ne sont pas essentiels. Nous avons vu, plus haut, que Wilson observait la condensation, en l'absence de noyaux, lorsque l'humidité relative de l'air dépassait 800 pour cent.

Lorsque nous disons que la condensation a formé une gouttelette d'eau, nous voulons dire qu'un nombre suffisamment grand de molécules d'eau se sont réunies pour former une gouttelette liquide. En l'absence d'un noyau de condensation, les molécules d'eau ne peuvent se réunir qu'à la suite de collisions accidentelles. Des groupes de molécules se forment puis sont immédiatement brisées par d'autres molécules, car dans un gaz, les molécules voyagent rapidement dans toutes les directions. Par contre, si des noyaux suffisamment gros sont disponibles dans l'air, des groupes de molécules pourront se former autour de ces noyaux sans être influencés par les chocs éventuels causés par l'arrivée d'autres molécules.

Il reste que même en l'absence de noyaux de condensation, si le groupe de molécules agglomérées est suffisamment important, il pourra continuer de croître au lieu de s'évaporer, mais dans des conditions

bien spéciales d'humidité. La tension de vapeur d'équilibre au-dessus d'une gouttelette d'eau pure est plus grande que la tension de vapeur d'équilibre au-dessus d'une surface d'eau plane, à la même température. Par conséquent, pour qu'une gouttelette d'eau pure demeure à l'état d'équilibre, c'est-à-dire pour qu'elle ne s'évapore pas, la tension de vapeur dans l'air environnant doit être au moins égale à la tension de vapeur d'équilibre au-dessus de la gouttelette. Elle doit donc être supérieure à la tension de vapeur saturante et l'air doit être sursaturé.

L'air devra être d'autant plus sursaturé que le rayon des gouttelettes sera plus petit. Ainsi, pour qu'une gouttelette d'un rayon de 0.001 micron puisse survivre, il faudra de l'air sursaturé à 223 pour cent. Une gouttelette de 0.1 micron de rayon, par ailleurs, n'exige que un pour cent à peine de sursaturation. Si, au lieu d'avoir une gouttelette d'eau pure, nous avons une gouttelette formée sur un noyau solubre, la tension de vapeur d'équilibre à la surface de cette gouttelette sera considérablement réduite dépendant de la nature et de la concentration du soluté. Dans ce cas, on assistera à la condensation dans des conditions de sursaturation bien inférieures aux sursaturations requises par des gouttelettes d'eau pure de mêmes dimensions. De plus, si les noyaux solubres sont hygroscopiques, comme le chlorure de sodium, les gouttelettes pourront se former et grossir avant même que l'air soit saturé. Lorsque l'humidité relative de l'air n'est encore que de 78 pour cent, la condensation s'amorce déjà sur les gros noyaux de sel marin présents dans l'atmosphère.

F) Dimensions des noyaux de condensation

On a classé les noyaux de condensation en trois catégories selon leur grosseur. Les "noyaux d'Aitken", du nom de leur découvreur, sont les plus petits. Leur rayon se situe entre 0.001 micron et 0.4 micron. Ce sont les plus nombreux. On en compte ordinairement de 1,000 à 10,000 par centimètre cube. Leur composition est encore mal connue. On sait que certains de ces noyaux sont d'origine minérale. Une théorie récente, celle de F.W. Went (1964) veut qu'un très fort pourcentage des noyaux d'Aitken soit d'origine organique. Certaines substances volatiles produites par les plantes, telles les alcènes (oléfines) et les terpènes existent en grande quantité dans l'atmosphère. Sous l'action de la lumière et en présence de catalyseurs tels que l'iode et le bioxyde d'azote, il se formerait des agrégats de ces molécules organiques: ce seraient les noyaux d'Aitken.

Les "gros noyaux" sont ceux dont le rayon est compris entre 0.4 et 1.0 micron. On en compte quelques centaines par centimètre cube. Ces gros noyaux sont formés pour la plupart de sulfates provenant des fumées des usines ou produits dans l'atmosphère par photosynthèse à partir de déchets de combustion contenant du soufre. Un fort pourcentage de ces gros noyaux sont composés de sulfate d'ammonium. On rencontre également, dans cette catégorie, des gouttelettes d'acide nitrique. Ces gros noyaux sont pour la plupart hygroscopiques et par conséquent, très efficaces comme noyaux de condensation.

Enfin, les "noyaux géants" sont ceux ayant un rayon de 1.0 à 10 microns. Ils sont clairsemés; on n'en compte pas plus d'un par

centimètre cube. Ils sont beaucoup plus nombreux au-dessus des océans qu'au-dessus des continents. Ce sont les noyaux géants de sel marin dont nous avons parlé précédemment.

III - CLASSIFICATION DES NUAGES

La classification des nuages actuellement en usage dans le monde porte le nom de CLASSIFICATION INTERNATIONALE. Elle est approuvée par l'Organisation météorologique mondiale représentant les services météorologiques de presque tous les pays du globe. On l'a publiée d'abord en 1895, puis revisée en 1910 et en 1930.

A) Historique

Lors d'une communication présentée devant les membres de la Ashesian Society de Londres et publiée pour la première fois dans le Philosophical Magazine en 1803, Luke Howard a proposé une classification des nuages dans laquelle il donnait des noms latins à quatre types de base, c'est-à-dire les noms de CIRRUS, CUMULUS, NIMBUS et STRATUS et utilisait des formes composées de ces noms pour désigner des types intermédiaires. En tout, Howard a identifié sept types de nuage. Cette classification d'Howard ne constituait pas un premier essai pour donner des noms aux divers types de nuages, mais elle était la première et la seule à être acceptée d'une façon générale. Plus tard, des météorologistes ont préconisé des modifications à cette classification et quelques-unes de ces modifications ont été intégrées au système proposé initialement par Howard.

Lors de la création de l'Organisation météorologique internationale, on a discuté de la question d'une classification uniforme des nuages et c'est la classification de Luke Howard qui a été proposée pour utilisation internationale en 1891 à la conférence de Munich. Un comité de cette conférence a préparé un atlas des types de nuages dont la première édition a paru en 1896. Une seconde édition apportant de légères modifications a été publiée en 1910.

En 1921, lors d'une réunion de l'Organisation météorologique internationale à Londres, on a créé pour l'étude des nuages un comité qui devait reviser l'atlas international des nuages. Commencé en 1926, le travail de revision a été finalement exécuté et terminé par un sous-comité siégeant à Paris. C'est de ce travail de revision que provient la troisième édition de l'atlas général complet des nuages publié en 1932 (11).

La classification des nuages donnée plus bas est donc tirée de l'atlas international des nuages (2, 13).

B) Nuage, brouillard et brume

En général, un nuage diffère d'un brouillard seulement par sa situation. Le nuage et le brouillard résultent tous deux du refroidissement de l'air en bas de son point de rosée. Dans le cas du nuage, ce refroidissement vient d'habitude d'un mouvement de bas en haut de l'air ambiant. C'est pour cette raison qu'un nuage est toujours distant du sol, sauf en pays de montagnes. D'un autre côté, le brouillard est produit par le refroidissement de l'air à la surface du sol et ne

s'étend qu'en surface, du moins durant les premiers stades de son développement. En somme, le brouillard consiste en gouttelettes d'eau ou en cristaux de glace flottant dans l'air près de la surface du sol, tandis que le nuage, composé également de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace flottant dans l'air, est situé assez loin au-dessus de la surface terrestre. Alors que le brouillard réduit la visibilité horizontale, d'après une convention internationale, à moins de un kilomètre, la brume, composée de gouttelettes d'eau beaucoup plus petites et dispersées, permet une visibilité généralement supérieure à un kilomètre. Dans la brume, on ne ressent ni froid, ni humidité remarquable comme dans le brouillard.

C) Familles de nuages

Les 10 genres ou types de nuages désignés maintenant par des noms internationaux sont classés en quatre familles comme suit:

FAMILLE 'A': NUAGES SUPERIEURS

(Niveau inférieur moyen: 6,000 mètres, 20,000 pieds)

I - Genre CIRRUS

II - Genre CIRROCUMULUS

III - Genre CIRROSTRATUS

FAMILLE 'B': NUAGES MOYENS

(Niveau supérieur moyen: 6,000 mètres, 20,000 pieds;
niveau inférieur moyen: 2,000 mètres, 6,500 pieds)

IV - Genre ALTOCUMULUS

V - Genre ALTOSTRATUS

FAMILLE C : NUAGES INFERIEURS

(Niveau supérieur moyen: 2,000 mètres, 6,500 pieds
niveau inférieur moyen: voisin du sol)

VI - Genre STRATOCUMULUS

VII - Genre STRATUS

VIII - Genre NIMBOSTRATUS

FAMILLE D : NUAGES A DEVELOPPEMENT VERTICAL

(Niveau supérieur moyen: niveau des Cirrus,
niveau inférieur moyen: 500 mètres, 1,600 pieds)

IX - Genre CUMULUS

X - Genre CUMULONIMBUS

Les niveaux indiqués correspondent aux climats tempérés et se rapportent non pas au niveau de la mer, mais au niveau général du sol dans la région.

D) Définition et description des nuages

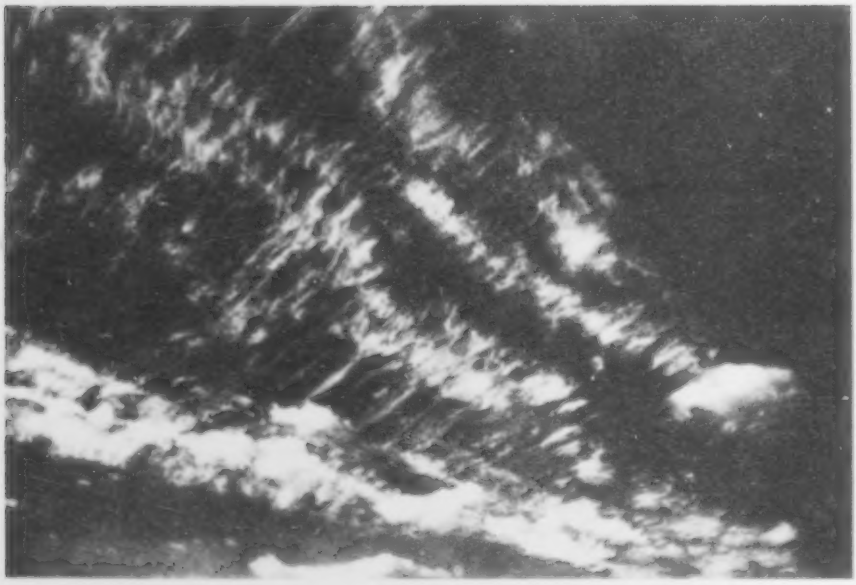
Nous présentons plus bas la définition et la description des genres de nuages et nous ajoutons à ces genres quelques-unes des espèces et des variétés les plus remarquables. Les abréviations entre parenthèse sont les symboles utilisés par l'observateur pour indiquer dans son carnet les genres de nuages qu'il reconnaît lors des relevés à sa station météorologique (12).

I - CIRRUS (Ci.)

Nuages isolés, délicats, à texture fibreuse, sans ombres propres, généralement de couleur blanche, souvent d'un éclat soyeux (Fig. 3, 4, 5).

Figure 3. - CIRRUS FILOSUS RADIATUS

Les grandes bandes RR convergent vers l'horizon, vers H, apparaissent nettement. On distingue les traces d'une organisation suivant une deuxième direction rr. Il en résulte la forme dite "en arête de poisson" ou "en vertèbre". En cc petits Cumulus de beau temps.



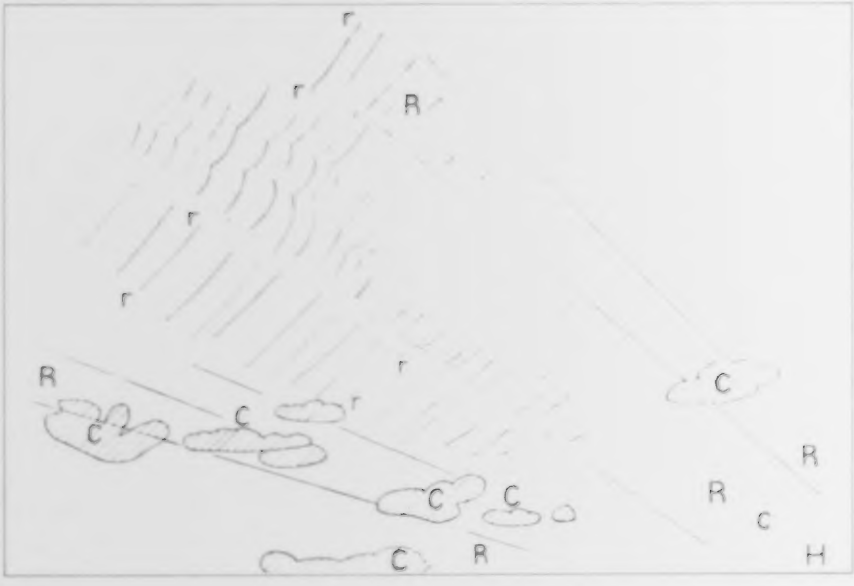
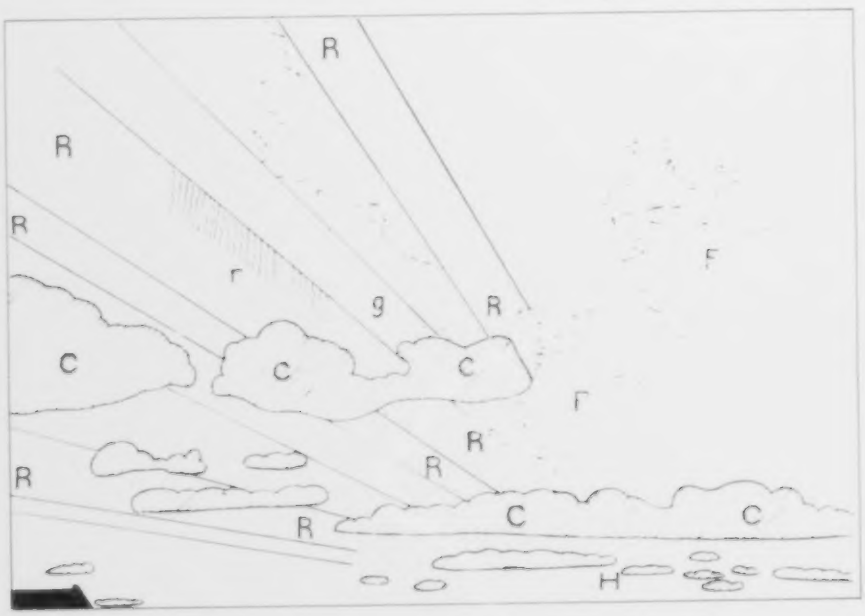

r
r
R
r
r
r
R
C
C
C
C
C
C
R
R
C
R
C
H

Figure 4. - CIRRUS UNCINUS

La forme en crochet est très nette avec la tige droite TT et l'extrémité recourbée en griffe GG. Dans l'élément qui est le plus bas sur la photo, quoiqu'il soit assez empâté, on devine encore l'amorce des tiges tt et des crochets gg.

Figure 5. - CIRRUS RADIATUS

Les bandes polaires RR, très nettes, convergent vers H. A l'intérieur des bandes, le nuage est épais, assez uniformément blanc; mais la structure filamenteuse apparaît en FF; par endroits, il y a transition au Cirrocumulus en fines rides r ou en grains g. En CC Cumulus humilis.


R
R
R
C
C
C
R
R
R
R
C
C
H

Les Cirrus présentent les formes les plus variées, comme de touffes isolées, de traits crayonnés sur le ciel bleu, de fils ramifiés à la manière de plumes (Fig. 3) de fils courbés finissant par des touffes (Fig. 4), etc.; ils sont souvent disposés en bandes qui traversent une partie de la voûte du ciel comme des arcs de grand cercle (Fig. 3, 5) et qui, par un effet de perspective, convergent vers un point ou vers deux points opposés de l'horizon (souvent les Cirrostratus et les Cirrocumulus participent à la formation de la bande).

Remarques:

Les Cirrus sont toujours composés de cristaux de glace et leur transparence est due à l'état de dispersion de ces cristaux.

A l'ordinaire quand ils passent devant le soleil, ils affaiblissent à peine son éclat. Néanmoins, lorsqu'ils sont exceptionnellement épais, ils peuvent diffuser la lumière de l'astre et en effacer le contour (comme le feraient des débris d'Altostratus, dont ils se distinguent toutefois par la blancheur éclatante et soyeuse des bords).

Les halos y sont assez rares.

Avant le lever et après le coucher du soleil, les Cirrus se teintent parfois de jaune ou de rouge vif. Ils s'éclairent longtemps avant les autres nuages et s'éteignent beaucoup plus tard; quelque temps après le coucher du soleil, ils deviennent gris. D'ailleurs, à toute heure de la journée, les Cirrus à l'horizon prennent souvent une teinte jaunâtre due à la grande épaisseur d'air traversée

par le rayon visuel, en raison de leur éloignement.

Espèces:

1.- CIRRUS FILOSUS (Fig. 3)

Filaments plus ou moins rectilignes ou irrégulièrement courbés aux extrémités fines (ni touffes, ni griffes) et sans parties soudées.

2.- CIRRUS UNCINUS (Fig. 4)

Cirrus en forme de virgule, la queue se terminant en haut soit par une griffe, soit par une petite touffe.

3.- CIRRUS DENSUS

Cirrus dont la densité est si forte qu'un observateur peu attentif pourrait les confondre avec des nuages moyens ou inférieurs.

4.- CIRRUS NOTUS

Cirrus provenant d'un Cumulonimbus et constituant des résidus de la partie supérieure glacée de cette sorte de nuage.

II - CIRROCUMULUS (Cc.)

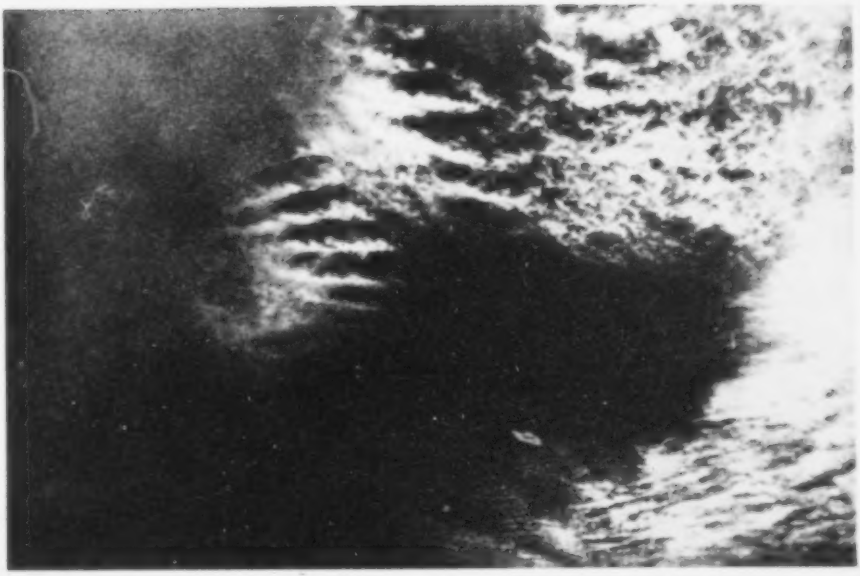
Couche ou banc cirreux composé de petits flocons blancs ou de très petites balles sans ombres (Fig. 6), qui sont disposés, soit en groupes, soit en files, soit plutôt en rides semblables à celles que présente le sable des plages.

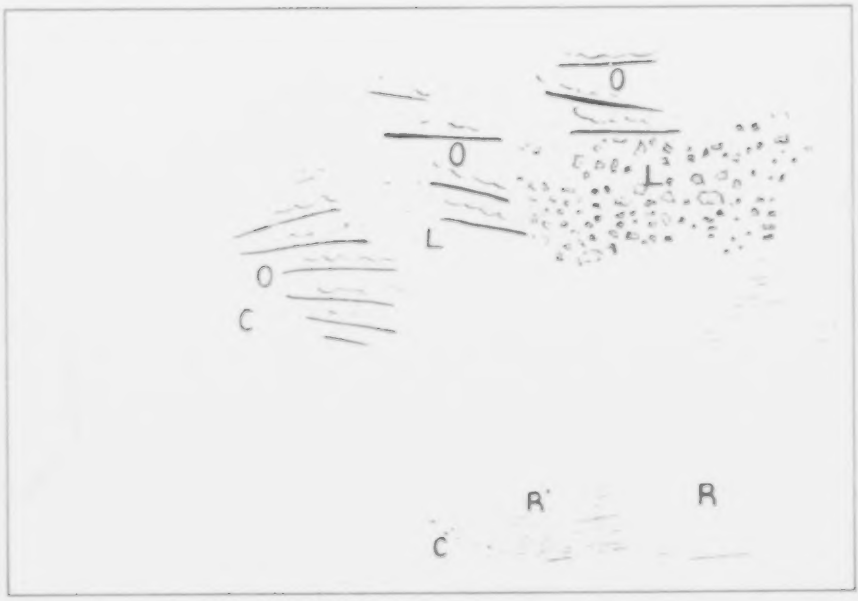
Remarques:

Les Cirrocumulus représentent en général un état dégénéré des Cirrus et des Cirrostratus qui, en se transformant, peuvent leur donner naissance. Dans ce cas, les bancs en transformation conservent fréquemment, par endroits, une structure filamenteuse.

Figure 6. - CIRROCUMULUS lacunaire

La structure ondulatoire est nette notamment en OO et la structure lacunaire en LL. Le banc nuageux présente en RR de fines rides, surtout en R', typiques des Cirrocumulus. En CC structure cirreuse. Forme voisine de l'Altocumulus.




O
O
L
O
C
R'
R
C

Le véritable Cirrocumulus est une forme rare. Il ne faut pas le confondre avec les petits Altostratus en bordure des bancs d'Altocumulus.

III - CIRROSTRATUS (Cs.)

Voile fin, blanchâtre, qui n'efface pas les contours des disques solaire ou lunaire, mais donne naissance à des halos autour de ces astres (Fig. 7, 8). Tantôt il est tout à fait diffus et donne seulement au ciel un aspect laiteux (Fig. 7), tantôt il montre plus ou moins distinctement la structure fibreuse en filaments embrouillés.

Remarques:

Pendant le jour, lorsque le soleil est assez élevé au-dessus de l'horizon, l'épaisseur du voile est toujours insuffisante pour supprimer les ombres portées des objets sur le sol.

Un voile laiteux de brume qui pourrait se confondre avec un voile de Cirrostratus d'aspect semblable, s'en distingue (Fig. 7) par les phénomènes de halo que donne presque toujours le soleil ou la lune à travers le Cirrostratus.

Espèces:

1.- CIRROSTRATUS NEBULOSUS (Fig. 7)

Voile nébuleux très uniforme, tantôt très léger et à peine visible, tantôt relativement dense, toujours sans détails nets et avec des phénomènes de halo.

2.- CIRROSTRATUS FILOSUS

Voile blanc, fibreux, où les stries sont plus ou moins nettes,

ressemblant souvent à une nappe de Cirrus denses, d'où il peut d'ailleurs provenir.

IV - ALTOCUMULUS (Ac.)

Couche (ou bancs) composée de lamelles ou galets, les plus petits éléments de la couche, encore disposés régulièrement, étant assez petits et minces, avec ou sans parties ombrées (Fig. 9, 10, 11). Ces éléments s'ordonnent en groupes, en files, ou en rouleaux, suivant une ou deux directions (Fig. 9, 10, 11) et sont parfois si serrés que leurs bords se rejoignent. Les bords des éléments minces et translucides présentent souvent des irrisations qui sont à peu près caractéristiques de ce genre nuageux.

Sous-genres:

A) ALTOCUMULUS TRANSLUCIDUS (Fig. 9, 10)

Altocumulus formés d'éléments dont la couleur, du blanc éclatant au gris sombre, et l'épaisseur sont très diverses d'un cas à l'autre ou même dans une couche déterminée, et qui sont plus ou moins régulièrement disposés et distincts. Dans la définition de ces éléments c'est le degré de transparence de la couche, variable d'un point à un autre, qui joue le rôle essentiel. Ils laissent apparaître dans les intervalles, soit le bleu du ciel, soit au moins un éclairement plus vif de la couche nuageuse dû à un amincissement.

B) ALTOCUMULUS OPACUS

Altocumulus constituant une nappe continue, au moins sur la plus grande partie de la couche, d'éléments sombres plus ou moins irréguliers, dans la définition desquels la transparence ne joue plus un

Figure 7. - CIRROSTRATUS NEBULOSUS

Ce nuage n'est guère révélé que par le halo HH. Toutefois en tt on distingue des traces de structure filamenteuse. En S la lueur du Soleil; en CC des bourgeonnements de Cumulus.

H
H
t
t
S
C
C

Figure 8. - CIRROSTRATUS LENTICULARIS

On compte facilement au moins huit bancs. Les filaments cirreux apparaissent par endroits notamment en FF. C'est une forme de transition entre le Cirrostratus et les Cirrus.

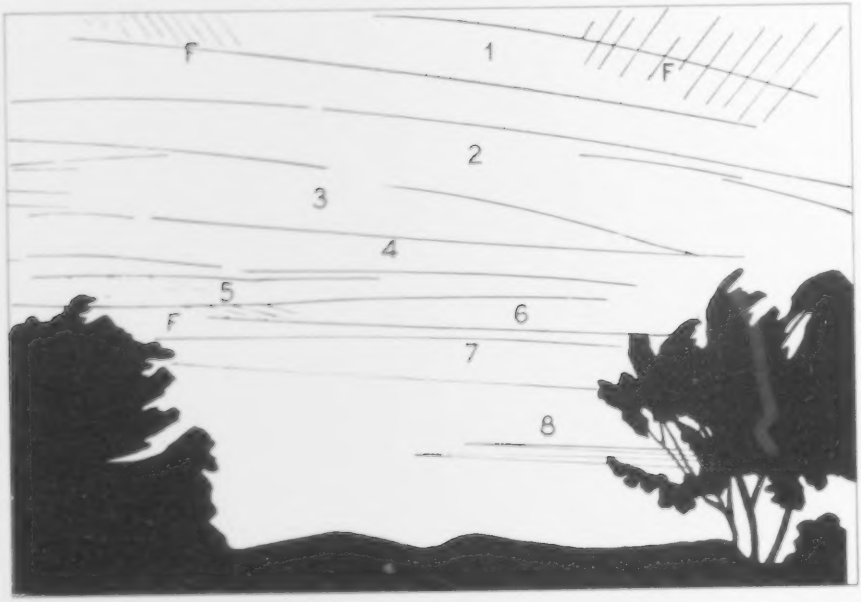
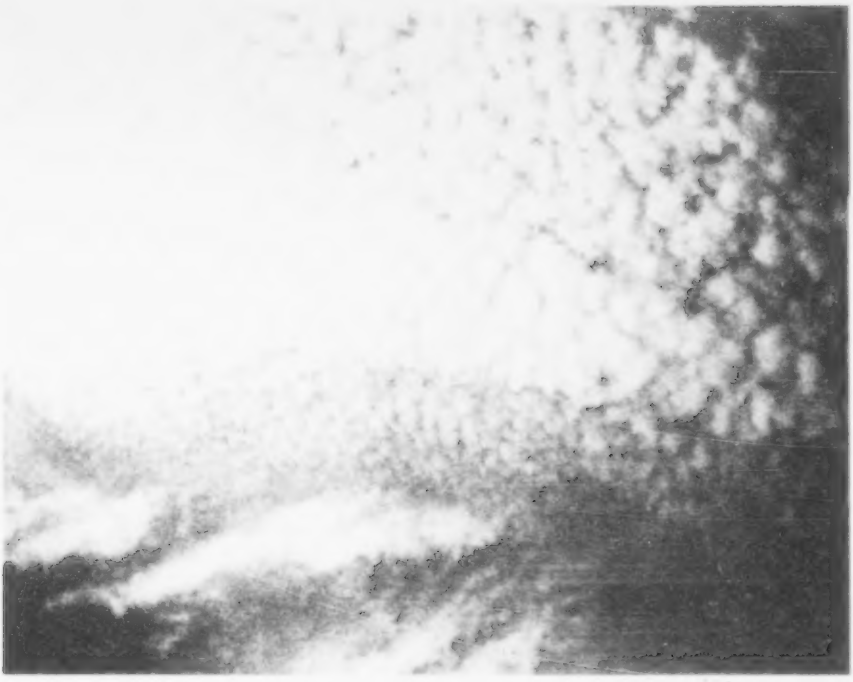

F
1
F
2
3
4
5
F
6
7
8

Figure 9. - ALTOCUMULUS TRANSLUCIDUS en balles

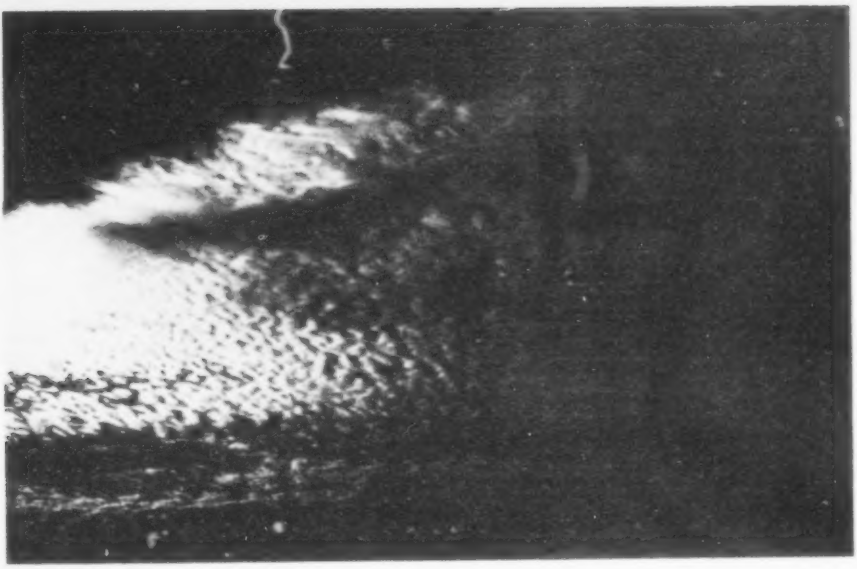
Une double ondulation suivant RR et rr produit des éléments grossièrement sphériques mais peu épais (pas d'ombre propre). Sur les bords la taille des éléments décroît rapidement (ee) de telle manière qu'ils pourraient être pris pour des Cirrocumulus, n'était leur solidarité avec la couche à gros éléments et l'absence de structure cirreuse. Situation orageuse.



r
R
r
r
r
R
e
e

Figure 10. - ALTOCUMULUS TRANSLUCIDUS en balles

En O partie épaisse avec ombre propre: absence de solidarité avec les Cirrus. Aussi malgré la dimension relativement petite des balles B, doit-on dénommer le nuage Altocumulus et non Cirrocumulus. En F, sur le bord structure fibreuse. En Q, effet de quinconce par alignement des balles suivant deux directions. Une dissolution se manifeste autour de la lacune L.



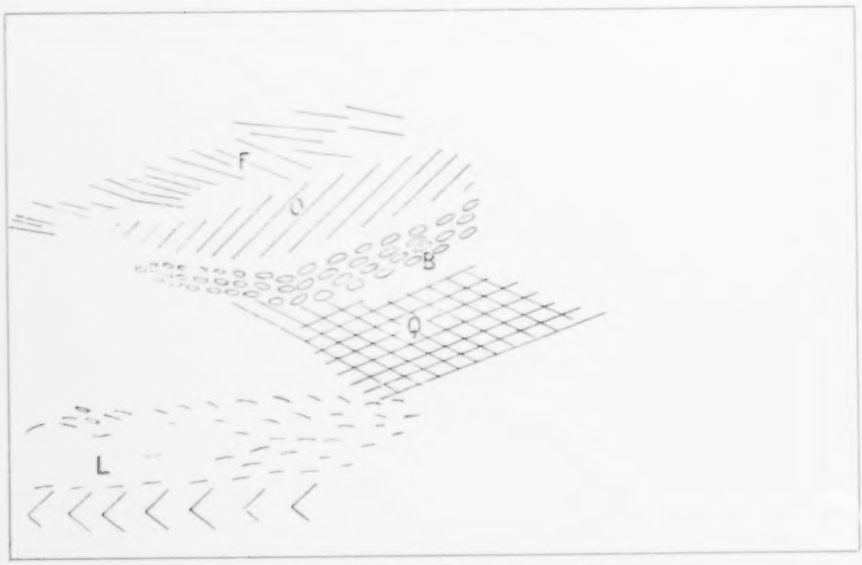
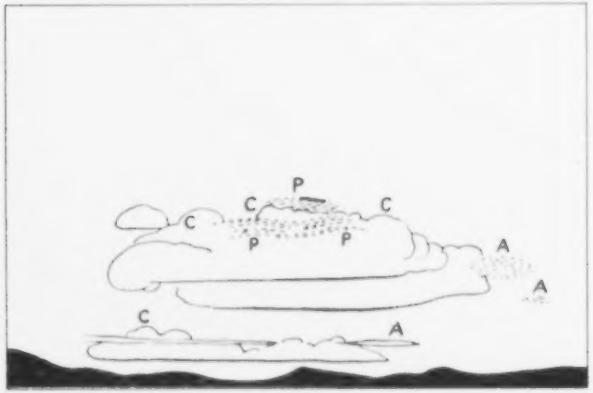
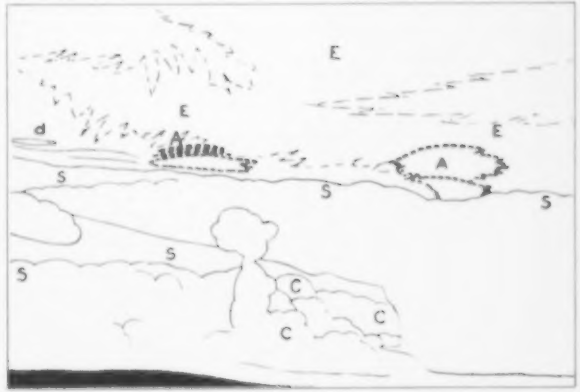

F
C
B
Q
L

Figure 11. - ALTOCUMULUS LENTICULARIS

Naissance d'Altocumulus lenticularis AA à partir de pileus PP. Les pileus dont certains présentent une structure feuilletée, dénotent l'existence de couches saturées où la condensation se produit sous l'effet de la convection correspondant au Cumulus. On remarquera que s'il y a des bourgeonnements importants CC, le développement vertical du Cumulus n'est pas très considérable; ce n'est donc pas une condition nécessaire de formation des pileus. En SS il y a manifestement une surface d'étalement du Cumulus au-dessus de laquelle se trouvent les Altocumulus AA déjà détachés des parties cumuliformes. En J, désagrégation, en E banc de Cirrus.


P
C
C
C
P
P
A
A
C
A


E
E
E
d
A
A
S
S
S
S
S
C
C
C

rôle notable, en raison de l'épaisseur et de la densité de la couche, mais qui ressortent en relief véritable à sa surface inférieure.

Remarques:

Aux niveaux inférieurs où les Altocumulus naissent parfois par l'étalement des parties supérieures des Cumulus, ils peuvent être assez facilement confondus avec des Stratocumulus; on admettra, par convention, qu'il s'agit d'Altocumulus lorsque les plus petits éléments nettement définis, régulièrement disposés, et observables sur l'ensemble de la couche (c'est-à-dire abstraction faite des éléments désagrégés qui figurent généralement sur le bord), ne dépassent pas, suivant leur plus petite dimension, 10 diamètres solaires, c'est-à-dire environ la largeur apparente de trois doigts, le bras tendu.

Quand le bord ou bien une partie mince et translucide d'un banc d'Altocumulus passe devant le soleil ou la lune, une couronne, anneau coloré (rouge à l'extérieur, vert à l'intérieur) étroit, apparaît au contact de l'astre; ce phénomène est beaucoup moins fréquent dans le cas des Cirrocumulus; d'autre part, il ne peut être donné que par des Stratocumulus élevés.

Quant aux irisations mentionnées dans la définition, et qui sont un phénomène tout à fait du même ordre que les couronnes, elles peuvent servir à distinguer à coup sûr les Altocumulus des Cirrocumulus et des Stratocumulus.

Aux altitudes les plus élevées, les Altocumulus constitués par des éléments de faible dimension, ressemblent aux Cirrocumulus; ils s'en distinguent comme ne possédant aucun des trois caractères

attribués aux Cirrocumulus: (1) solidarité avec des Cirrus ou des Cirrostratus; (2) évolution à partir de Cirrus ou de Cirrostratus; (3) propriétés dues à la structure physique (cristaux de glace) et énumérées à propos des Cirrus.

Avec les Altocumulus, on peut fréquemment noter des traînées filiformes ou des queues descendantes auxquelles on donnera le nom de virga.

Espèces:

1.- ALTOCUMULUS CUMULOGENITUS

Ce sont des Altocumulus formés par étalement des sommets de Cumulus, ceux-ci ayant disparu; la couche au premier stade de la formation, présente l'aspect d'Altocumulus opacus.

Variétés:

Il y a lieu de noter une variété importante d'Altocumulus, l'ALTOCUMULUS CUMULIFORMIS qui présente deux aspects différents:

a) ALTOCUMULUS FLOCCUS

Flocons ressemblant à de petits Cumulus sans base, plus ou moins déchirés.

b) ALTOCUMULUS CASTELLATUS

Masses cumuliformes, plus ou moins développées verticalement, rangées en file et reposant sur une base commune horizontale, ce qui donne au nuage une apparence crénelée.

V - ALTOSTRATUS (As.)

Voile fibreux ou strié de couleur plus ou moins grise ou

Figure 12. - **ALTOSTRATUS TYPIQUE MINCE (Altostratus translucidus)**

L'Altostratus est uniforme et translucide. Le Soleil donne encore une illumination assez nette (S). Le nuage n'est donc pas un Nimbostratus. Mais on n'en distingue plus le contour et il n'y a pas de phénomène de halo. Le nuage n'est donc pas un Cirrostratus. En FF, petits Fractostratus à légère tendance cumuliforme; le voile d'Altostratus étant interposé entre eux et le Soleil, ils apparaissent très sombres.

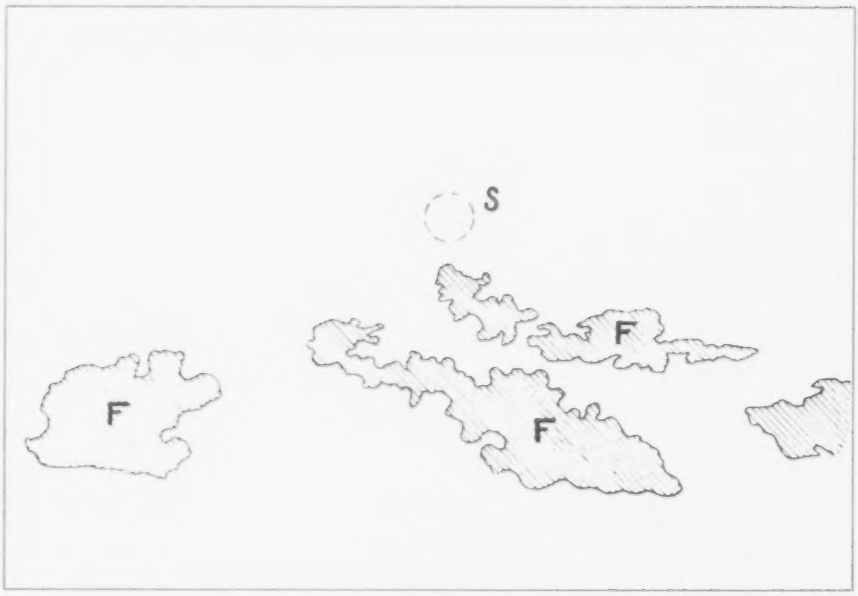

S
F
F
F

Figure 13. - ALTOSTRATUS TRANSLUCIDUS avec parties opacus

Voile d'Altostratus assez translucide à l'horizon, mais en voie d'épaississement. En S tache du Soleil presque invisible. La structure fibreuse du voile s'observe en FF. En CC Cumulus très plats, en voie de disparition.

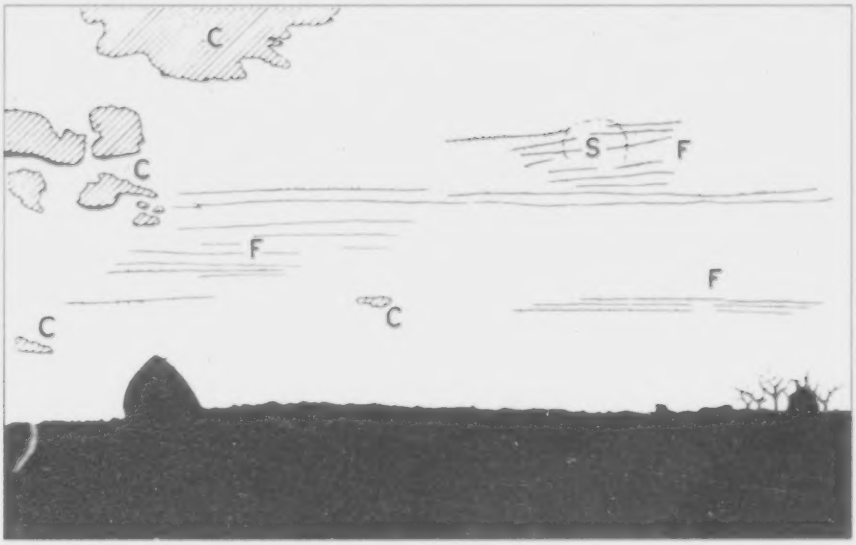

C
C
S
F
F
F
C
C

Figure 14. - CIEL CENTRAL TYPIQUE ET DE CONVECTION MODEREE

Voile complet d'Altostratus s'épaississant par endroits (GG). En S tache du Soleil. En FF Cumulus locaux, en voie de résorption sous le voile d'Altostratus.

S
G
G
F
F
F
F

bleuâtre (Fig. 12, 13, 14). Il ressemble à un Cirrostratus épais, mais ne donne pas de phénomène de halo et ne laisse voir le soleil ou la lune que vaguement, sous l'aspect d'une lueur trouble, comme à travers un verre dépoli. Tantôt (Fig. 12) il est mince, offrant toutes les transitions avec le Cirrostratus. Tantôt (Fig. 13) il est très épais et sombre, pouvant aller jusqu'à masquer complètement le soleil ou la lune. En ce cas il présente souvent, par suite de différences d'épaisseur, des zones relativement claires entre des zones très sombres, mais on ne perçoit jamais de relief véritable à sa surface et il présente toujours par endroits, dans sa masse même, la structure fibreuse ou striée (Fig. 13).

On trouve toutes les transitions entre l'Altostratus élevé et le Cirrostratus, d'une part, et l'Altostratus bas et le Nimbostratus, d'autre part.

La pluie ou la neige peuvent tomber de l'Altostratus (Altostratus praecipitans), mais dans le cas de la pluie, quand elle devient forte, le voile nuageux s'est épaissi et abaissé, devenant un Nimbostratus, tandis que la neige abondante peut tomber d'un voile qui est encore de l'Altostratus.

Sous-genres:

A) ALTOSTRATUS TRANSLUCIDUS (Fig. 12, 13, 14)

Voile d'Altostratus ressemblant à un Cirrostratus épais et qui laisse apparaître le soleil ou la lune comme à travers un verre dépoli.

B) ALTOSTRATUS OPACUS

Couche d'Altostratus opaque et d'épaisseur variable, pouvant

cacher entièrement le soleil, au moins par places, mais présentant par endroits la structure fibreuse.

C) ALTOSTRATUS PRAECIPITANS

Couche d'Altostratus opaque n'ayant pas encore perdu le caractère fibreux et donnant de faibles précipitations (pluie ou neige) continues ou intermittentes. Ces précipitations peuvent ne pas arriver jusqu'au sol et constituent alors des virga.

Remarques:

Les limites entre lesquelles on peut rencontrer l'Altostratus sont assez espacées (5,000 à 2,000 mètres environ).

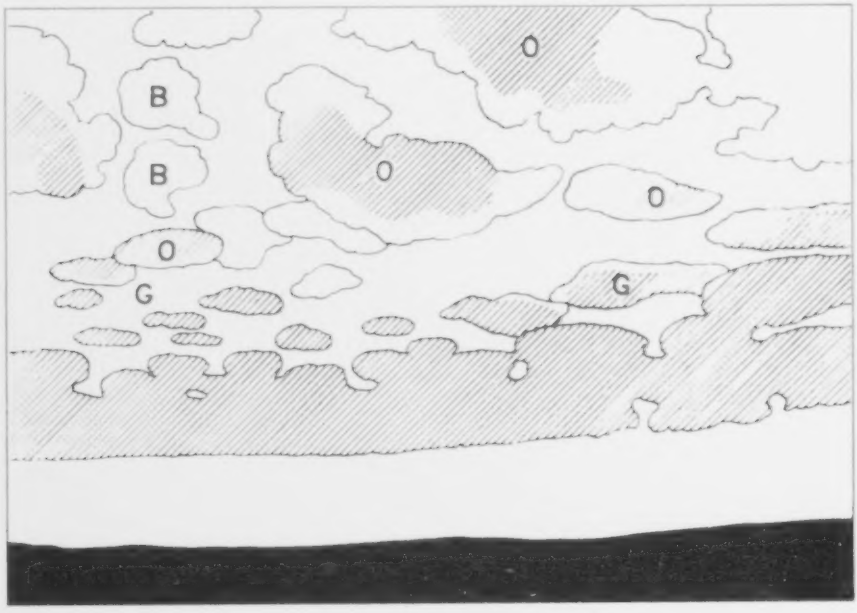
On peut distinguer un voile d'Altostratus élevé d'un voile de Cirrostratus d'aspect assez semblable en admettant, par convention, que l'Altostratus ne peut plus donner les phénomènes de halo et que les ombres portées des objets sur le sol ont disparu.

On peut distinguer un voile d'Altostratus bas d'un voile de Nimbostratus d'aspect assez semblable au moyen des caractères suivants: le Nimbostratus est d'un gris sombre beaucoup plus uniforme, à l'exclusion de toute partie d'un éclat blanchâtre ou de structure fibreuse; on ne peut pas du tout localiser sa surface inférieure qui présente alors un aspect "mouillé" dû, en effet, à de la pluie qui n'atteint pas le sol.

En outre, on peut admettre, par convention, que le Nimbostratus masque toujours complètement, en tout point de sa surface, le soleil ou la lune, alors que l'Altostratus peut ne les masquer que par endroits, lorsqu'ils se présentent derrière les zones les plus sombres,

Figure 15. - STRATOCUMULUS TRANSLUCIDUS

Les éléments nuageux présentent de fortes ombres propres OO, mais laissent apercevoir de larges zones de ciel bleu (translucidus): leur forme va de la balle BB au galet GG. La photo a été prise à l'altitude 1,750 mètres. Cette couche appelée Stratocumulus par un observateur rapproché d'elle, serait peut-être appelée Altocumulus par un observateur placé au niveau de la mer, malgré la grande épaisseur (ombre très forte).


O
B
B
O
O
O
G
G
O

tandis qu'ils réapparaissent derrière les zones plus claires (Fig. 13). Une nappe d'Altostratus, même trouée par endroits, est caractérisée par une structure généralement fibreuse (Fig. 13, 14). Une couche nuageuse, même continue, mais où la structure fibreuse n'existe pas et dans laquelle un moutonnement reste perceptible, sera donc désignée par le nom d'Altocumulus ou de Stratocumulus suivant le cas.

VI - STRATOCUMULUS (Sc.)

Couche ou bancs composés de galets ou bourrelets, les plus petits éléments de la couche encore disposés régulièrement étant assez gros, flous et gris avec parties sombres (Fig. 15, 16, 17, 18).

Ces éléments s'ordonnent en groupes, en files ou en rouleaux, suivant une ou deux directions. Très souvent les bourrelets sont si serrés que leurs bords se rejoignent: quand ils couvrent alors tout le ciel, sur le continent, surtout en hiver, ils lui donnent une apparence ondulée.

Sous-genres:

A) STRATOCUMULUS TRANSLUCIDUS (Fig. 15)

Couche de Stratocumulus pas très épaisse, laissant apparaître, dans les intervalles entre les éléments, soit le bleu du ciel, soit au moins un éclairement plus vif de la masse nuageuse, amincie et réduite à sa partie supérieure.

B) STRATOCUMULUS OPACUS

Couche de Stratocumulus très épaisse, constituée par une nappe continue de gros bourrelets ou galets sombres, qui apparaissent, non pas à cause d'un degré de transparence variable, mais parce qu'ils

ressortent en relief véritable à la surface inférieure de la masse nuageuse.

Remarques:

Les éléments dont est composé un Stratocumulus énais (Stratocumulus onacus) tendent assez fréquemment à se souder complètement et la couche peut, dans certains cas, se transformer en Nimbostratus. On appellera le nuage Nimbostratus lorsque la structure en mottes du Stratocumulus aura disparu et lorsque, grâce aux virga généralisées, la surface inférieure ne se présentera plus comme nettement délimitée.

Le Stratocumulus peut se transformer en Stratus et inversément. Le Stratus étant plus bas, les éléments deviennent très vastes et très flous, de sorte que la structure en galets ou en rouleaux, plus ou moins régulièrement disposés, disparaît pour l'observateur. On conservera le nom de Stratocumulus tant que cette structure sera encore visible.

Espèces:

1.- STRATOCUMULUS VESPERALIS

On donne ce nom aux nuages plats et allongés qu'on voit souvent se former vers le coucher du soleil comme produit final d'une évolution diurne de Cumulus.

2.- STRATOCUMULUS CUMULOGENITUS (Fig. 18)

Stratocumulus formé par étalement des sommets de Cumulus ceux-ci ayant disparu; la couche au premier stade de la formation, présente l'aspect de Stratocumulus onacus.

Figure 16. - STRATOCUMULUS irréguliers

En BB on distingue la structure de balles plus ou moins agglomérées, partout ailleurs le nuage est très irrégulier et en EE il est tout à fait effiloché.

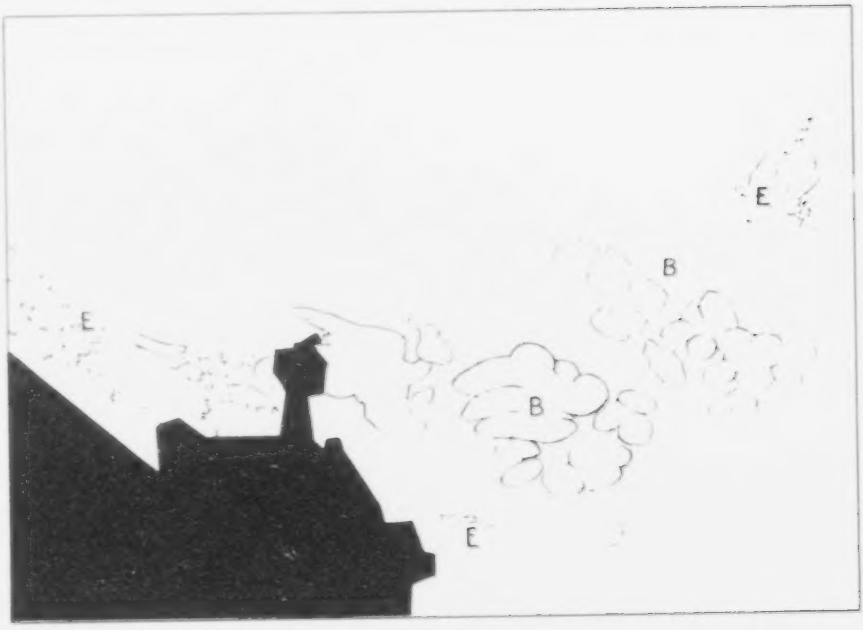

E
B
E
B
E

Figure 17. - STRATOCUMULUS morcelé

Les éléments nuageux GG affectent une forme vaguement lenticulaire. En S, Soleil couchant; les nuages, à contre-jour, sont très sombres. Il ne s'agit vraisemblablement pas d'un produit de l'évolution diurne des Cumulus, mais plutôt de la désagrégation d'une couche plus complète de Stratocumulus.

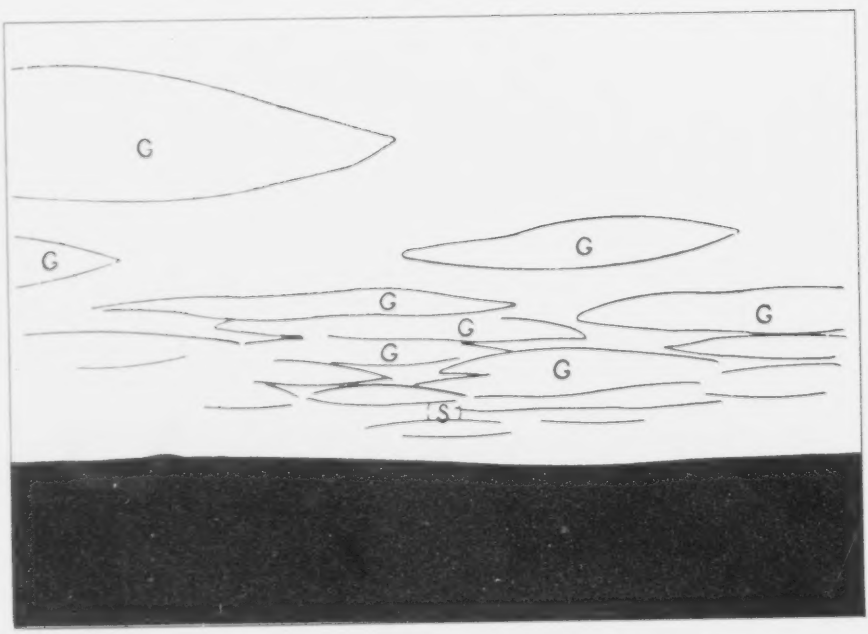

G
G
G
G
G
G
G
G
S

Figure 18. - STRATOCUMULUS CUMULOGENITUS

Le nuage SS est en voie de formation et encore solidaire du puissant Cumulus congestus CC', qui lui donne naissance par un premier étalement: le Cumulus continuant à se développer a d'ailleurs percé (C') la partie stratifiée. Le Stratocumulus est assez uniforme relativement aux bourgeonnements en choux-fleurs très découpés du Cumulus.

C'
S
S
C

Variétés:

a) STRATOCUMULUS UNDULATUS

Stratocumulus à un seul système d'ondulations. Il importe de ne pas le confondre avec des Cumulus plats ordonnés en file.

b) STRATOCUMULUS LACUNATUS

Stratocumulus à surface inférieure de relief accentué où l'on distingue des mamelles ou des rides pendantes, qui semblent parfois sur le point de se détacher du nuage. Il faut se garder de confondre ce nuage avec certains Altostratus opacus qui paraissent régulièrement ridés, mais qui s'en distinguent par leur structure fibreuse.

VII - STRATUS (St.)

Couche nuageuse uniforme, analogue à un brouillard mais qui ne repose pas sur le sol (Fig. 18, 20, 21, 22).

Quand cette couche, très basse, est déchirée en lambeaux irréguliers, on peut les distinguer (Fig. 19) sous le nom de Fractostratus (Fs.).

Remarques:

Le voile de Stratus proprement dit donne généralement au ciel un aspect brumeux et uniforme très caractéristique qui risque toutefois d'être confondu, dans certains cas, avec un Nimbostratus.

Quand il y a précipitation la distinction est immédiate: le Nimbostratus donne de la pluie, ou parfois de la neige, continue, c'est-à-dire une précipitation composée de gouttes qui peuvent être petites, mais alors éparses, ou bien serrées, mais alors grandes, au moins pour une part; quant au Stratus il ne donne que de la bruine,

c'est-à-dire une précipitation composée de très petites gouttes serrées.

Quand il n'y a pas précipitation, une couche de Stratus sombre et uniforme peut facilement se confondre avec un Nimbostratus. On peut dire toutefois que la surface inférieure du Nimbostratus a un aspect "mouillé" (virga généralisées) et tout à fait uniforme, toute localisation y étant impossible; le Stratus, par contre, a un aspect plus "sec"; en outre, quelque uniforme qu'il soit, il présente encore des contrastes et un éclairement par transparence (places moins sombres parce que moins épaisses, correspondant aux intervalles entre les bourrelets ou les galets de Stratocumulus, mais considérablement agrandis) alors que le Nimbostratus semble seulement illuminé faiblement par l'intérieur.

Fréquemment le Stratus est un nuage local et lorsqu'il se déchire, on aperçoit le bleu du ciel.

Quant aux Fractostratus, tantôt ils proviennent de la désagrégation d'une couche de Stratus (Fig. 19), tantôt ils prennent naissance, puis se développent jusqu'à former couche au-dessous d'un Altostratus ou d'un Nimbostratus, qu'on aperçoit souvent par les interstices (Fig. 12, 23).

La couche de Fractostratus se distingue du Nimbostratus par un aspect plus sombre et par son fractionnement en éléments. Si ces éléments ont un aspect cumuliforme par endroits, la couche nuageuse sera appelée Fractocumulus au lieu de Fractostratus (Fig. 23).

Figure 19. - STRATUS

On aperçoit le versant de la colline en V à travers les Fractostratus F.

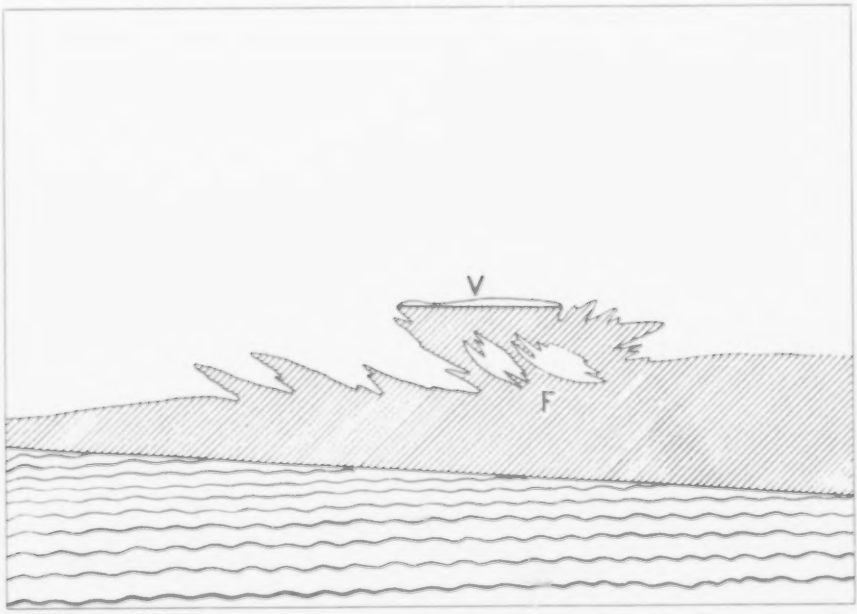

V
F

Figure 20. - STRATUS LENTICULARIS

La forme grossièrement lenticulaire des bancs apparaît surtout en LL.

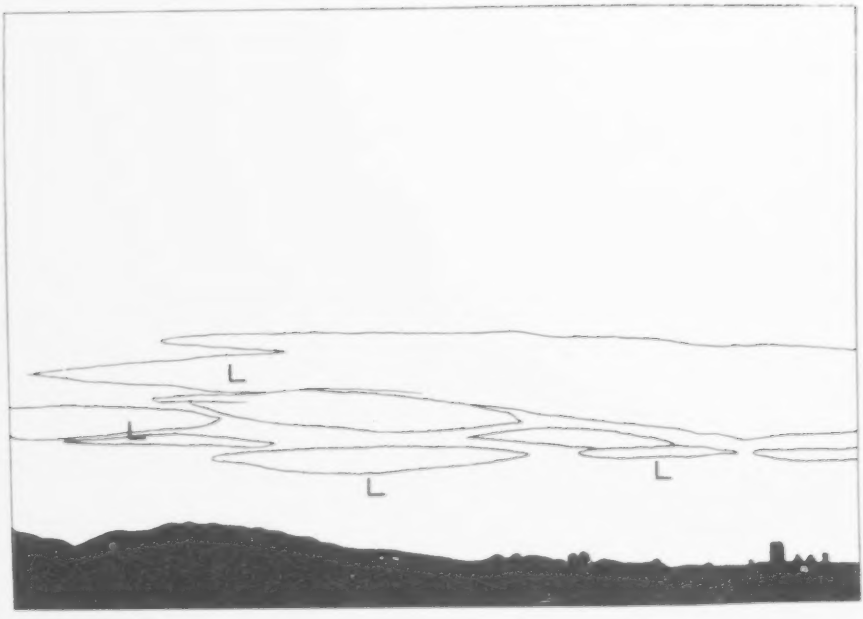

L
L
L
L

Figure 21. - STRATUS OROGRAPHIQUE

En SS, rouleau de Stratus de formation orographique sur la côte d'une île montagneuse, et affectant une forme plus ou moins lenticulaire. Au-dessus, couche de Cumulus de mauvais temps à bases nimbiformes NN.

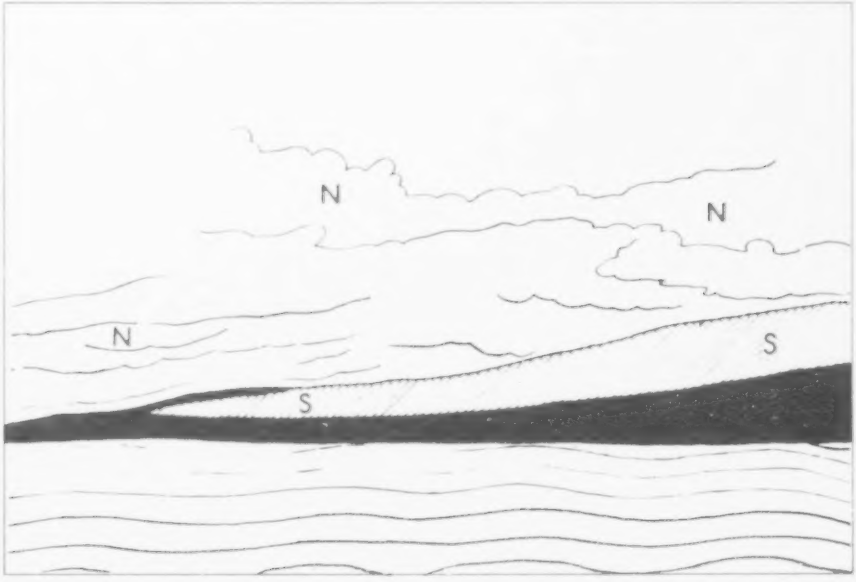
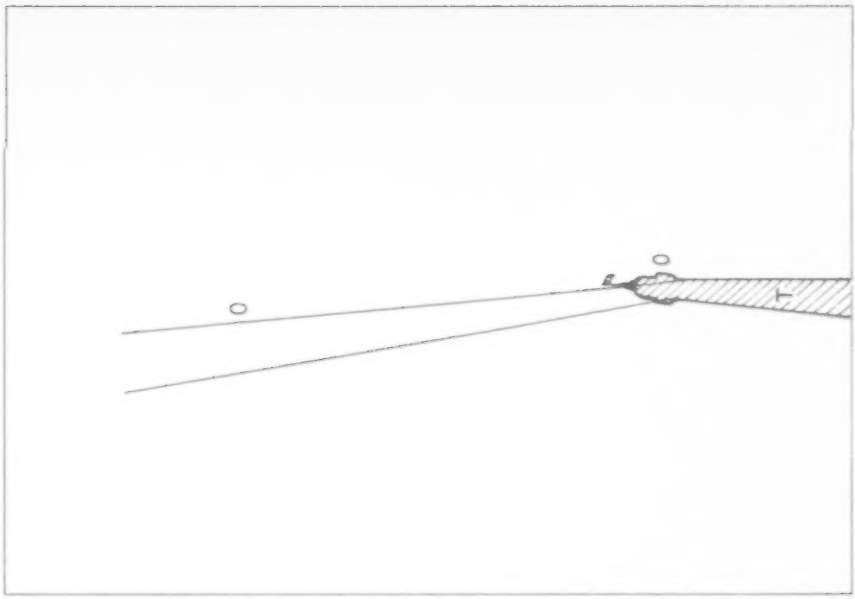

N
N
N
S
S

Figure 22. - CIEL DE TURBULENCE STRATIFORME

La photo est prise au moment où la brume se déchire et où le Soleil commence à apparaître derrière la tour T de manière que son ombre se projette dans la brume (00). On a observé presque immédiatement après un éclaircie avec des Cirrus. Exemple typique de Stratus et brume d'origine maritime, dissimulant les nuages supérieurs d'un ciel latéral. (Photo O.M.M., Paris, le 29 octobre 1925, à 14 h. vers SW)



VIII - NIMBOSTRATUS (Ns.)

Couche basse, amorphe et pluvieuse, d'une couleur gris sombre, presque uniforme, mais comme faiblement illuminée par l'intérieur. Quand elle donne de la précipitation, c'est sous forme de pluie ou neige continue.

Cependant les précipitations seules ne sont pas un critérium suffisant pour distinguer une telle couche de nuages qui devra être appelée Nimbostratus, alors même qu'il n'en tombe pas de pluie ou de neige.

Souvent il y a précipitation, mais n'atteignant pas le sol, en ce cas, la base de la couche est toujours diffuse et comme "mouillée" du fait de virga généralisées, de sorte qu'il n'est pas possible d'en localiser la surface inférieure.

Remarques:

L'évolution normale est la suivante: une couche d'Altostratus s'épaissit et s'abaisse jusqu'à devenir une couche de Nimbostratus. Celle-ci, le plus souvent, se double progressivement de nuages très bas déchiquetés (Fig. 23), d'abord isolés, puis se soudant en une couche presque continue (dans les interstices de laquelle on aperçoit néanmoins le plus souvent le Nimbostratus). Ces nuages très bas sont à dénommer Fractocumulus ou Fractostratus, suivant qu'ils ont un aspect plus ou moins cumuliforme ou stratiforme.

IX - CUMULUS (Cu.)

Nuages épais, à développement vertical, dont le sommet forme dôme et est garni de protubérances arrondies, tandis que la base est

presque horizontale (Fig. 24, 25, 26, 27).

Quand le nuage est à l'opposé du soleil, les surfaces qui se présentent normalement à l'observateur sont plus brillantes que le bord des protubérances. Quand l'éclairement vient de côté, ces nuages offrent des ombres contrastées assez fortes (Fig. 24, 27); du côté du soleil, au contraire ils apparaissent sombres avec une bordure claire (Fig. 25, 26).

Le vrai Cumulus est nettement limité en haut et en bas, sa surface apparaissant souvent comme découpée dans une matière dure (Fig. 24, 27). Mais on observe aussi un nuage qui ressemble à un Cumulus déchiqueté et dont les diverses parties présentent de continuels changements; on le désignera sous le nom de Fractocumulus (Fc.).

Remarques:

Les Cumulus, dont la base est généralement de couleur grise, doivent présenter une structure homogène, c'est-à-dire être composés, même à leurs sommets, de monceaux à contours arrondis, à l'exclusion de toute structure fibreuse (Fig. 24, 27).

Même fortement développés, les Cumulus ne peuvent donner que de très faibles précipitations.

Les Cumulus sont parfois surmontés, lorsqu'ils atteignent le niveau des Altocumulus, d'un léger voile blanc diffus, de forme plus ou moins lenticulaire, à structure délicatement striée ou feuilletée sur les bords, dessinant généralement un arc qui peut couvrir à la fois plusieurs dômes d'un Cumulus et enfin être percé par eux. On désignera cette particularité, qui ne constitue pas une espèce, par le

Figure 23. - CIEL CENTRAL TYPIQUE ET CIEL DE TURBULENCE AMORPHE

Fractocumulus sombres NN courant au-dessous d'un voile grisâtre relativement clair (CC) d'Altostratus ou de Nimbostratus qu'on aperçoit dans les intervalles (la nuit au-dessus d'une ville éclairée, ce sont les Fractocumulus qui apparaîtraient en clair sur le fond noir de l'Altostratus). Pluie ou voisinage immédiat de la pluie. Si le contour des Fractocumulus, dans la partie supérieure, est assez flou (FF), on voit toutefois que les parties éclairées ne font pas partie des nuages bas.

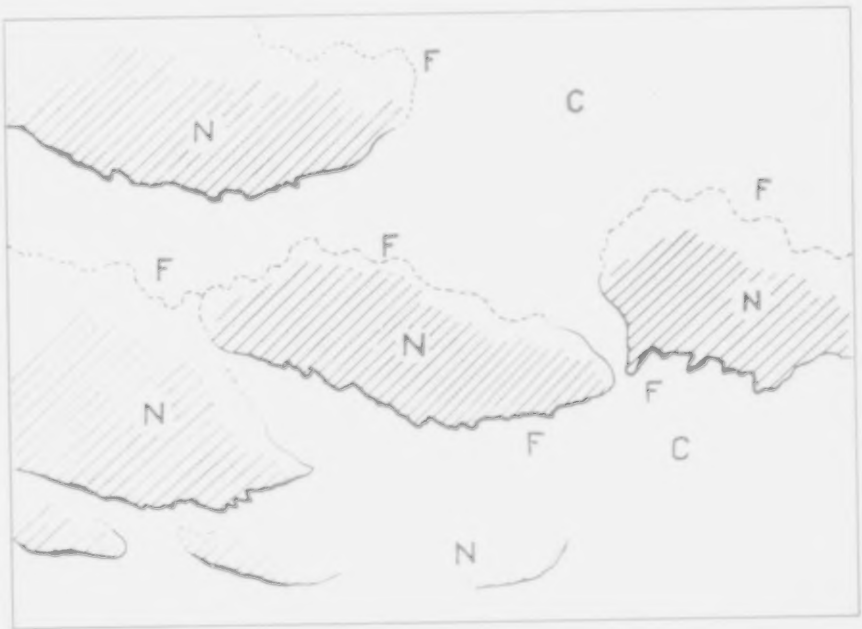

F
C
N
F
F
F
N
N
F
N
F
C
N

Figure 24. - CUMULUS

Ces nuages de beau temps présentent des bourgeonnements modérés bb et des bases nettement horizontales BB. Le maximum de variation diurne n'étant pas atteint, ils sont encore en voie de développement. En DD le nuage "fume" ce qui indique un processus de formation (fumulus) ou de dissolution.

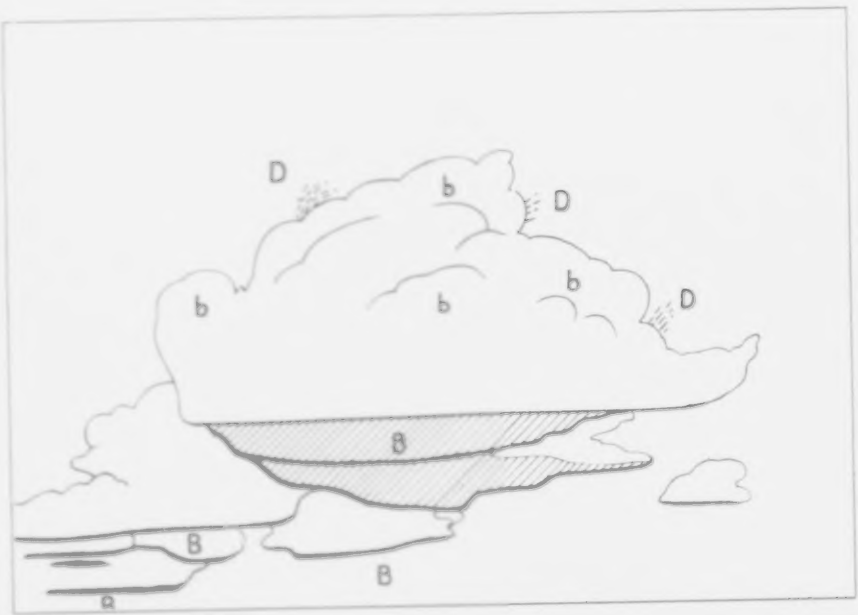

D
b
D
b
b
b
D
B
B
B
a

Figure 25. - CUMULUS HUMILIS

On remarquera l'horizontalité presque parfaite des bases et le faible dévelonpement vertical par rapport à l'extension horizontale, net surtout lorsque les nuages sont assez bas sur l'horizon: les ombres propres sont peu dévelonpées en raison de la faible épaisseur des individus nuageux.

Figure 26. - CUMULUS CONGESTIS

Masse importante de Cumulus à bourgeonnements complexes CC et à forte ombre propre. Les faisceaux de rayons solaires RR illuminent la brume autour du Cumulus.

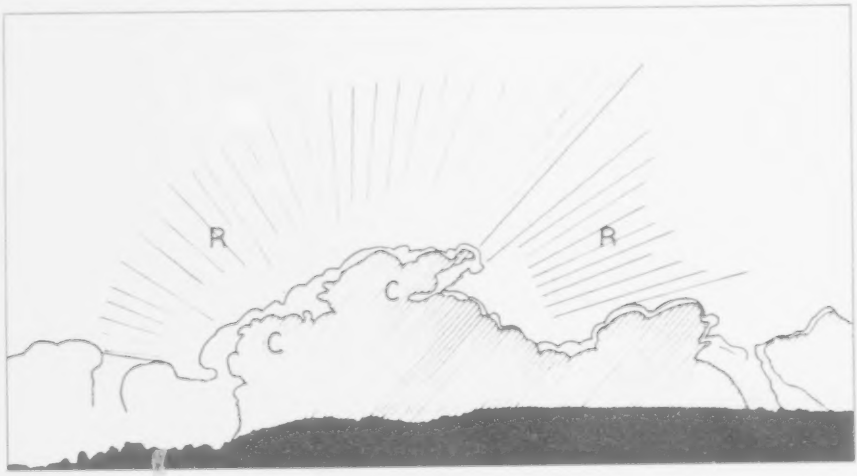
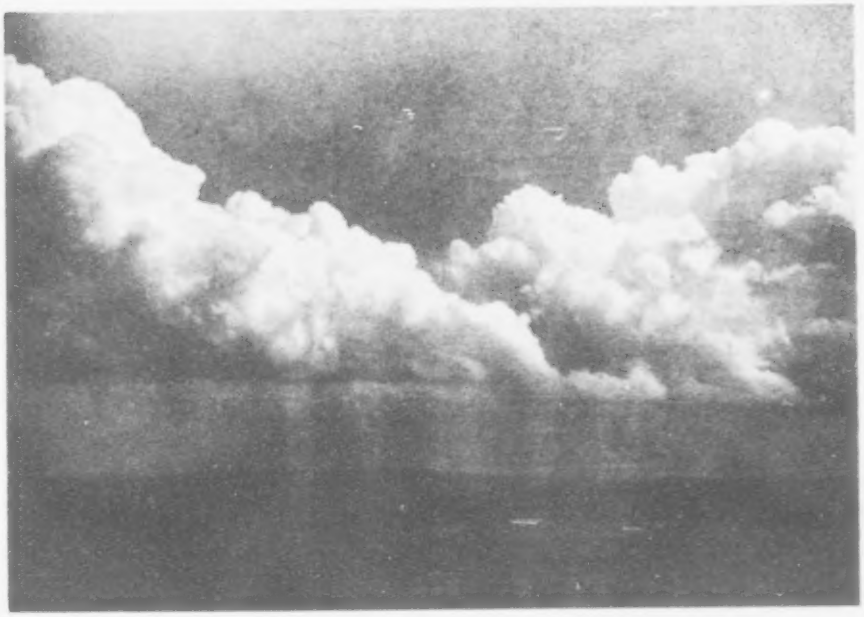
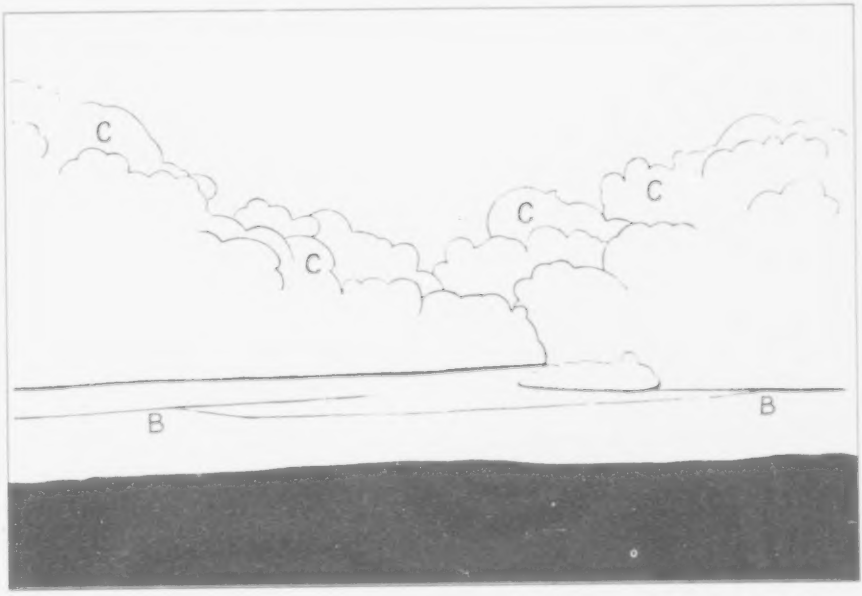

R
R
C
C

Figure 27. - CUMULUS CONGESTUS

Les bases BB sont nettement horizontales, mais les bourgeonnements cumuliformes CC s'entassent en masses puissantes; les sommets ne tarderont pas à passer au Cumulonimbus.




C
C
C
C
B
B

nom de pileus, bonnet ou capuchon.

Un Cumulus typique (Fig. 24) est celui qui se développe par temps clair et doit sa naissance aux courants diurnes de convection: sur terre il apparaît le matin, se gonfle ensuite et se résorbe plus ou moins en fin de journée.

Espèces:

1.- CUMULUS HUMILIS (Fig. 24, 25)

Cumulus peu développés en hauteur et comme aplatis. Ils s'observent généralement par beau temps.

2.- CUMULUS CONGESTUS (Fig. 26, 27)

Cumulus très gonflés, bourgeonnants, dont les dômes ont l'aspect de chou-fleur.

X - CUMULONIMBUS (Cb.)

Masses puissantes de nuages, à grand développement vertical, dont les assises cumuliformes s'élèvent en forme de montagnes ou de tours, et dont la partie supérieure est de texture fibreuse et s'étale parfois en forme d'enclume (Fig. 28, 29, 30, 31, 32).

Leur base (Fig. 31, 32) ressemble au Nimbostratus; on y observe généralement des virga apparentes. Cette base est souvent aussi (Fig. 32) doublée de nuages très bas déchiquetés (Fractostratus, Fractocumulus).

Les Cumulonimbus donnent généralement (Fig. 28) des averses de pluie ou de neige (parfois de grêle ou de grésil) et souvent aussi des orages.

Si le sommet du nuage n'a pu être observé entièrement, la chute d'une véritable averse suffit à caractériser le Cumulonimbus.

Remarques :

Sans même que sa forme extérieure générale le distingue d'un Cumulus ordinaire fortement développé, le Cumulonimbus est essentiellement caractérisé par les différences de structure dans les parties élevées, si elles sont visibles; on doit y observer à la fois la structure fibreuse et la structure cumuliforme. Des masses cumuliformes, si puissantes soient-elles et quel que soit leur développement vertical, ne doivent être appelées Cumulonimbus que si tout ou parties des sommets est transformé (Fig. 29, 30) ou en train de se transformer (Fig. 28) en masse cirreuse.

Quand un Cumulonimbus couvre presque tout le ciel, la base seule est visible et présente un aspect de Nimbostratus doublé ou non de Fractostratus ou Fractocumulus. La distinction entre la base d'un Cumulonimbus et un Nimbostratus est souvent très délicate à faire. Si la masse nuageuse ne couvre pas tout le ciel et si les parties supérieures du Cumulonimbus apparaissent si peu que ce soit, la distinction est immédiate. Sinon, elle n'est possible que si on a eu soin de suivre l'évolution précédente du ciel, ou si des précipitations interviennent; en effet, leur caractère est violent et discontinu (averses) dans le cas de Cumulonimbus, et s'oppose à la précipitation relativement lente et continue du Nimbostratus.

Le front des nuages orageux de grande étendue présente parfois un bourrelet en forme d'arc, de couleur sombre et d'aspect frangé,

Figure 28. - CUMULONIMBUS CALVUS

Les bases BB sont horizontales (temps calme) mais les bourgeonnements CC s'amoncellent sans qu'apparaisse de partie glacée au sommet. En V virga ne touchant pas le sol, en Λ averses tombant au sol.

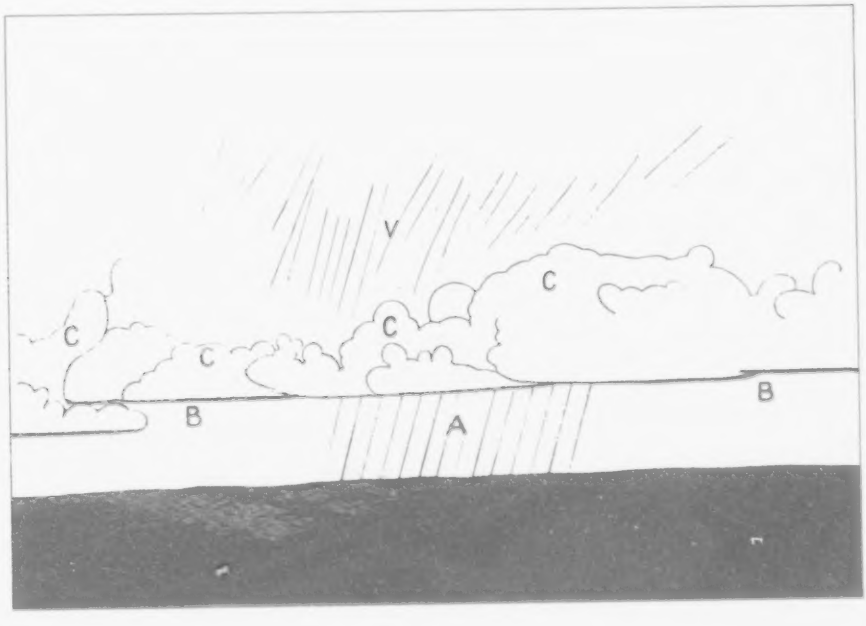

V
C
C
C
C
B
A
B

Figure 29. - CUMULONIMBUS CAPILLATUS

Masse puissante à base horizontale BB et à grand développement vertical. Parties cumuliformes nettes en CC. En TT transition du bourgeonnement cumuliforme à la partie glacée. En FF la glaciation est complète; les panaches de Cirrus commencent même à s'étaler en forme d'enclume (transition à Cumulonimbus incus).

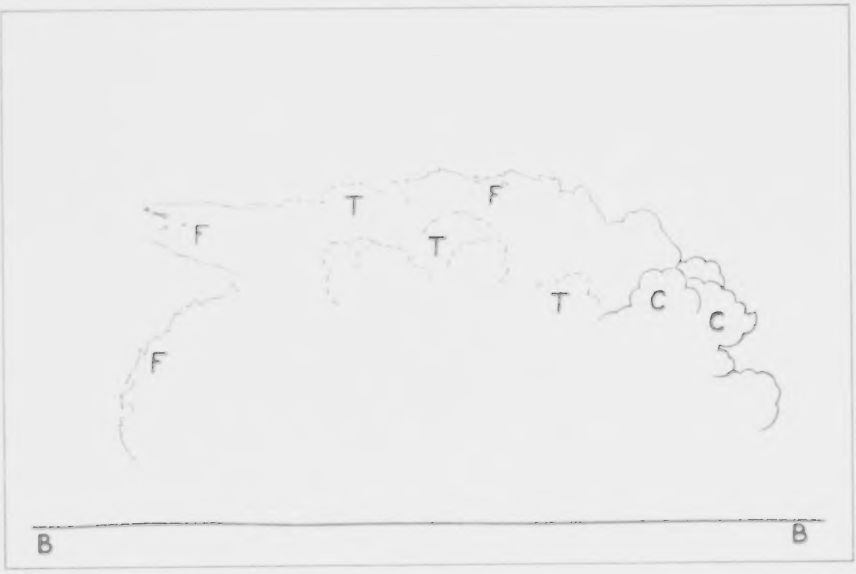

F
T
F
T
F
T
C
C
F
B
B

Figure 30. - CUMULONIMBUS INCUS

Le sommet du nuage formant enclume s'étale horizontalement contre une surface d'inversion II. Des Altocumulus AA se détachent en bandes sombres sur la masse plus claire du nuage.

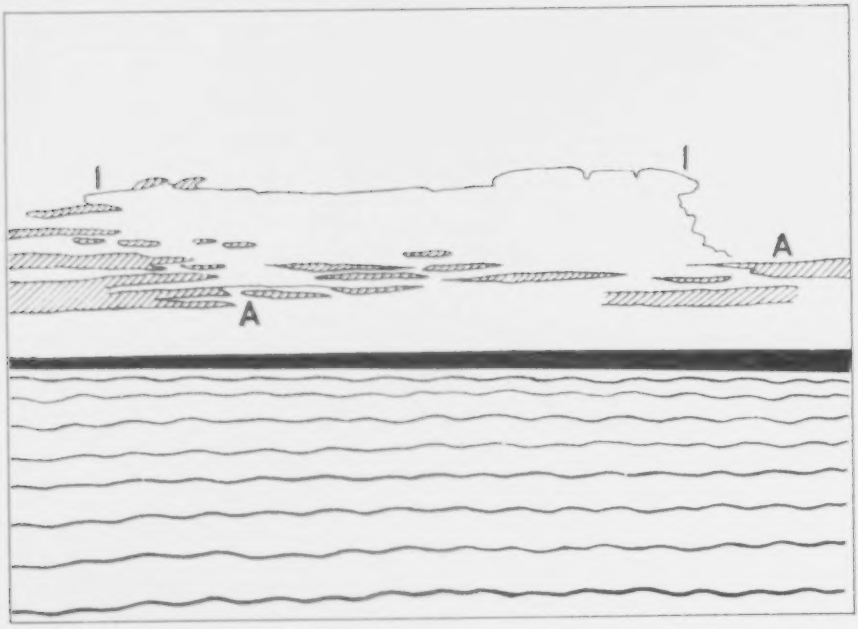

1
1
A
A

Figure 31. - CUMULONIMBUS MAMMATUS

Structure en rouleau RR. L'aspect mammatus est particulièrement net, toutefois en certains endroits (PP) les éléments sont piriformes plutôt qu'hémisphériques. Il est difficile de préciser exactement la partie du nuage dont il s'agit. Toutefois, il y a lieu de noter l'inclinaison de la surface nuageuse, l'aspect cirreux des bandes RR et l'éclairage des interstices entre les mamelons. Il s'agit sinon de l'enclume au moins d'une partie inférieure latérale.

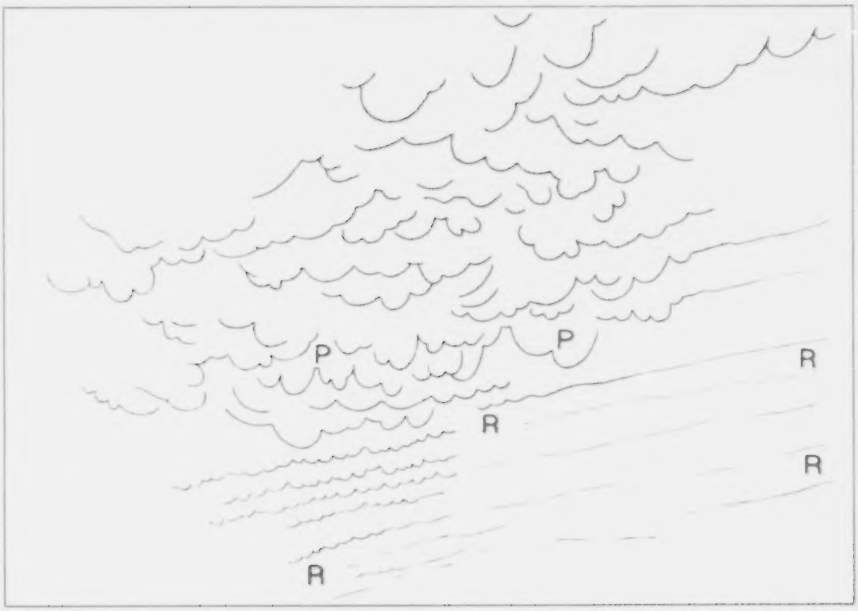
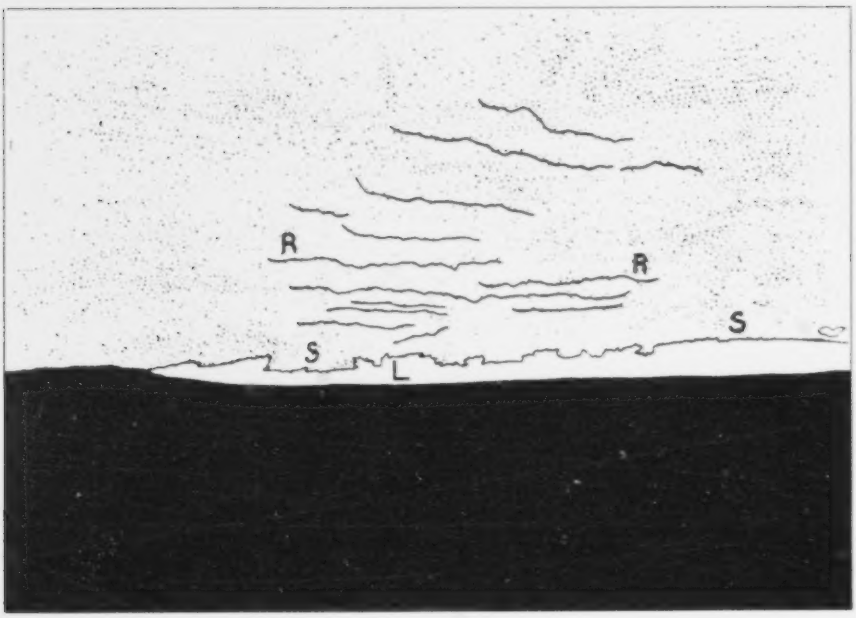

P
P
R
R
R
R

Figure 32. - CUMULONIMBUS ARCUS

On remarquera l'aspect effiloché de "l'arcus" qui se détache très sombre (SS) sur l'éclaircie L. Au-dessus de "l'arcus" les Fractocumulus des mauvais temps se pressent en rouleaux serrés RR.


R
R
S
S
L

circonscrivant une partie du ciel d'un gris plus clair. On peut noter sous le nom d'arcus cette particularité, qui n'est autre chose qu'une forme particulière des Fractocumulus ou Fractostratus (Fig. 32).

Assez fréquemment, la structure mammatus apparaît sur les Cumulonimbus, soit à leur base, soit sur la surface inférieure et latérale de l'enclume (Fig. 31).

Espèces:

1.- CUMULONIMBUS CALVUS (Fig. 28)

Cumulonimbus caractérisé par l'orage ou l'averse qu'il produit ou bien par des virga apparentes, mais dans lequel on ne distingue aucune partie cirriforme; toutefois, la glaciation des sommets est en général en cours et déjà nette; ils sont en voie de perdre leur structure cumuliforme, c'est-à-dire leur caractère gonflé et leurs contours précis; les bourgeonnements "durs" des "choux-fleurs" se brouillent et s'effacent pour ne plus laisser apparaître dans la masse blanche que des stries plus ou moins verticales. La glaciation, accompagnée d'évolution vers la structure fibreuse, se propage souvent très rapidement.

2.- CUMULONIMBUS CAPILLATUS (Fig. 29, 30)

Cumulonimbus qui présente des parties cirriformes nettes (ayant souvent, mais pas toujours, la forme d'un enclume).

E) Photographies

Les photographies qui accompagnent les diverses descriptions de nuages sont tirées de l'atlas international des nuages (2). Elles ont l'avantage d'être accompagnées de schémas explicatifs des plus u-

tiles à l'observateur. D'ailleurs, le texte même des descriptions de nuages est international et a été publié dans plusieurs pays (11). Dans les deux cas, nous nous en sommes tenus à un strict minimum pour alléger la présente publication. Rien n'empêche cependant l'observateur ou le photographe amateur de préparer sa propre collection de photographies de nuages.

Comment faire une bonne photographie de nuages? Ce n'est pas toujours facile; c'est souvent une question d'expérience. En général, il faut que le nuage occupe la majeure partie de la photographie. Pour donner une idée de la perspective et pour orienter le sujet, on peut inclure des objets tels que des arbres, des maisons, des montagnes, mais ces objets doivent occuper les bords seulement de la photographie. Il est certain que l'observateur possédant des éléments de météorologie peut reconnaître ou sélectionner avec plus d'aisance les sujets intéressants. A cet égard, l'observateur profitera de lectures plus approfondies sur la question.

On obtiendra d'excellentes photos en noir et blanc en utilisant du film à grain fin, panchromatique et en faisant usage de filtres. Le filtre jaune est excellent à plusieurs points de vue. Il permet d'obtenir des contrastes adéquats sans diminuer l'intensité de la lumière reçue. Le filtre orange et le filtre rouge permettent d'obtenir des contrastes plus marqués, mais ces deux filtres augmentent le temps d'exposition. L'usage de films en couleurs élimine pratiquement l'usage des filtres.

F) Nébulosité

Sans vouloir identifier les nuages, on réalise souvent la nécessité d'observer au moins la nébulosité du ciel. On appelle nébulosité, l'obscurcissement du ciel par les nuages. La nébulosité est évaluée d'habitude à l'estime d'après une échelle arbitraire allant de zéro à 10, zéro indiquant un ciel clair, c'est-à-dire un ciel absolument sans nuage, et 10 indiquant un ciel complètement couvert (14).

Lorsque les nuages sont visibles à travers un brouillard, ils sont notés comme si le brouillard n'existait pas. Au contraire, si le brouillard empêche l'observateur de voir les nuages, on considère le ciel comme étant complètement couvert et on enregistre le chiffre 10 dans le carnet d'observations.

Il faut se rappeler qu'un seul nuage, si petit soit-il, est suffisant pour l'enregistrement du chiffre 1; de même une très petite tache de bleu dans le ciel oblige l'observateur à noter le chiffre 9. Dans le premier cas, en effet, le ciel n'est pas complètement sans nuages et dans le deuxième, il n'est pas absolument couvert par les nuages.

IV - FORMATION DE LA PRECIPITATION

Le processus de formation des nuages nécessite dans l'atmosphère: (a) la présence de l'humidité, (b) un mécanisme de refroidissement et (c) l'existence de noyaux de condensation. Ce processus ne contribue cependant qu'à former des gouttelettes dont le rayon moyen est de sept microns. Ces gouttelettes sont en suspension dans l'air grâce aux courants verticaux ascendants toujours présents dans l'atmosphère nuageuse.

La pluie qui tombe des nuages est composée de gouttes d'eau dont le rayon varie de 200 à 3,000 microns. De plus, la pluie qui tombe ne semble aucunement altérer le nuage même. Le nuage est toujours là sans changement apparent quoiqu'il puisse fournir jusqu'à deux, trois et même cinq pouces de pluie en 24 heures sur une assez vaste étendue. Il faut donc deux mécanismes qui viennent s'ajouter aux mécanismes formateurs de nuages pour produire la précipitation. Le premier est un mécanisme de croissance des gouttelettes du nuage et le second, un mécanisme d'apport d'humidité si on veut conserver le nuage inaltéré indépendamment de la pluie qui tombe.

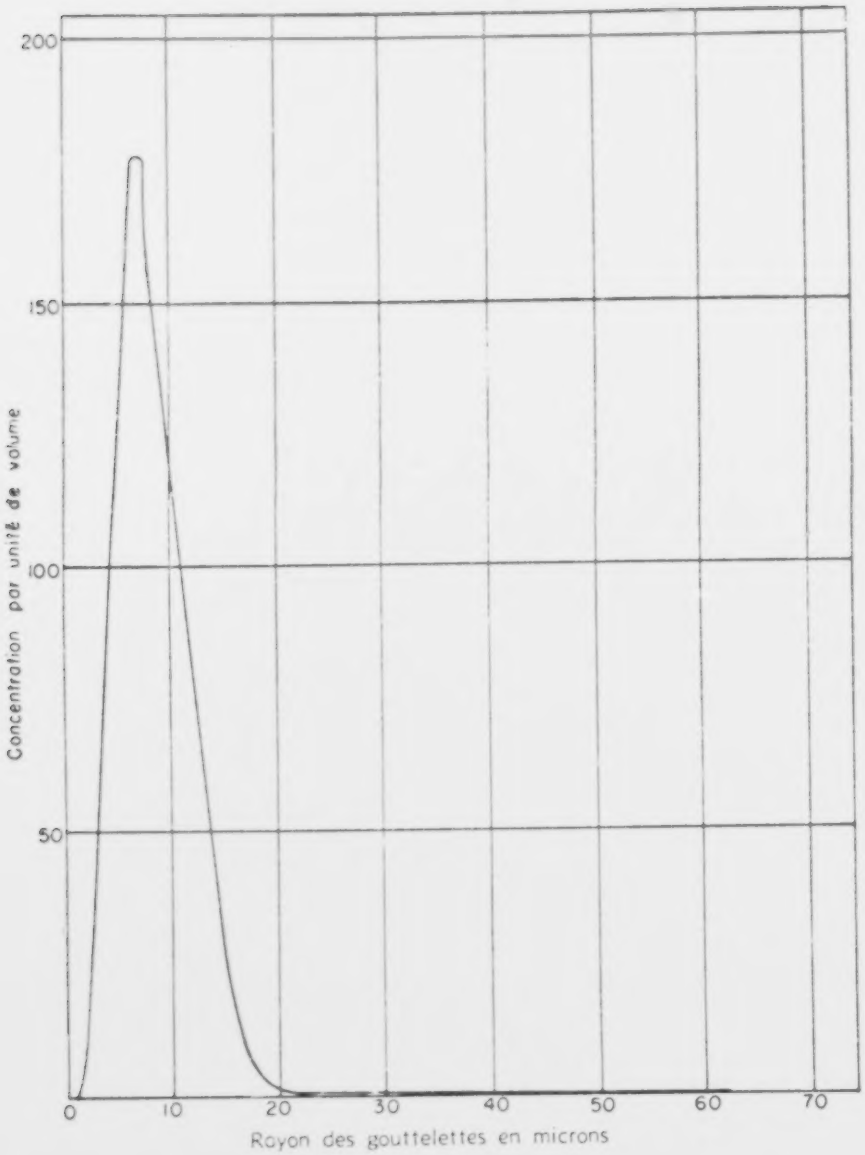
A) Croissance des gouttelettes

La croissance des gouttelettes du nuage est possible de diverses façons. La façon la plus simple qu'on puisse imaginer est la continuation du processus de condensation déjà responsable de la formation des gouttelettes du nuage. Un tel processus devrait se produire sur toutes les gouttelettes à la fois. Cependant, la condensation de toute la vapeur d'eau présente dans le nuage ne réussirait qu'à doubler le rayon moyen des gouttelettes qui était au départ de sept microns. Les gouttelettes ne réussiraient même pas à acquérir une vitesse de chute (1).

Nous avons déjà mentionné que les plus petites gouttes de pluie ont un rayon de l'ordre de 200 microns. Il faut donc que certaines gouttelettes s'accroissent au détriment des autres. En conséquence, il existe une discrimination dans la croissance des gouttelettes (4).

Figure 33. - LA CONCENTRATION MOYENNE DES GOUTTELETTES D'EAU en fonction du rayon des gouttelettes dans un Cumulus congestus

On remarquera que la plupart des gouttelettes ont un rayon compris entre 2 et 20 microns. Au delà de 20 microns, la distribution devient asymptotique à l'axe, montrant une très faible concentration. (D'après Diem, Met. Rundschau, I (1948), p. 261) (3).


200
150
100
50
0
10
20
30
40
50
60
70
Concentration par unité de volume
Rayon des gouttelettes en microns

B) Condensation sélective de la vapeur d'eau

Cette discrimination entre les gouttelettes résulte d'un principe général assez simple: la vapeur d'eau se condense toujours sur un objet (en l'occurrence les gouttelettes d'eau) où, en surface la tension d'équilibre de la vapeur d'eau est la moindre. Enoncé en fonction de la température, ce principe général devient: "Dans une enceinte à température non uniforme, la tension d'équilibre maximale d'une vapeur est égale à celle que cette vapeur aurait à la température la plus basse". C'est le principe de Watt, illustré par la condensation de la vapeur d'eau sur les fenêtres d'une habitation en hiver.

Dans l'atmosphère, on rencontre trois modes d'application de ce principe général.

Premier mode:

Les gouttelettes qui forment le nuage n'ont pas toutes le même rayon, ce rayon peut varier de trois à 100 microns (7, 16) ayant une valeur moyenne de sept microns. La figure 33 montre la distribution relative des gouttelettes dans un Cumulus congestus en fonction de leur rayon. Or, il arrive que la tension d'équilibre de vapeur d'eau d'une gouttelette dépend de son rayon de courbure. En général, plus une goutte est petite, plus sa tension d'équilibre est grande et, inversément, si la goutte est plus grosse. Donc, suivant le principe général énoncé, si deux gouttelettes de différentes grosseurs viennent assez rapprochées, la grosse gouttelette croîtra au détriment de la petite qui s'évaporera.

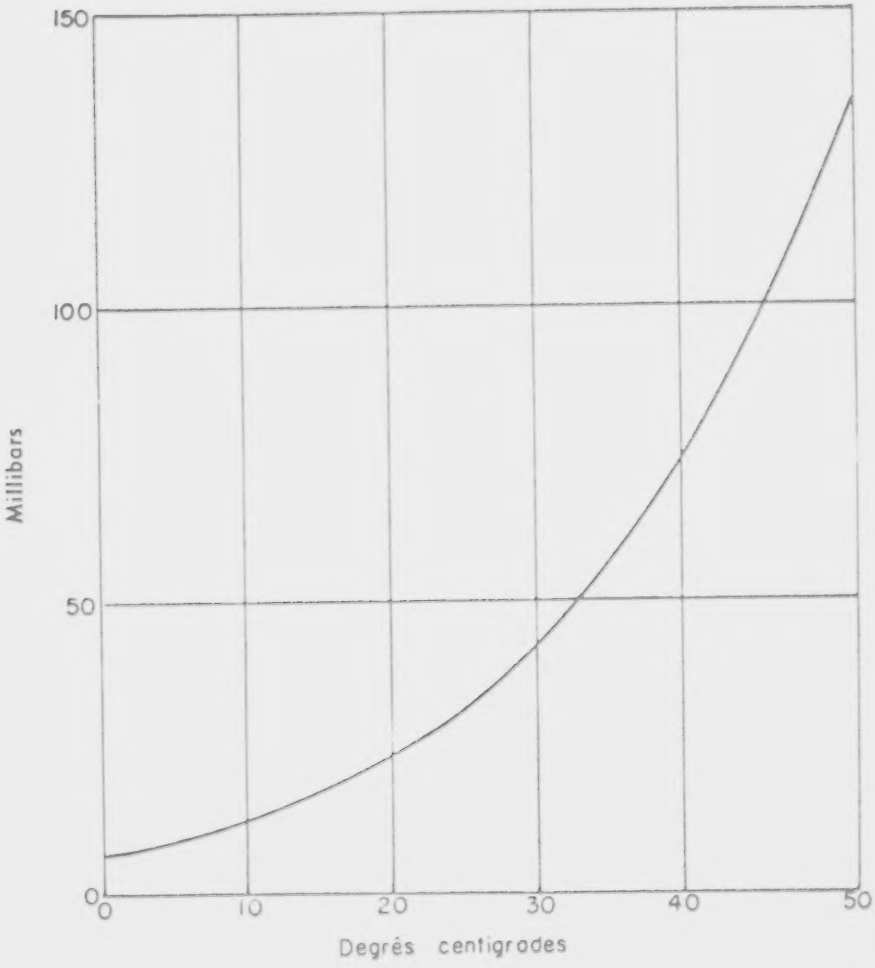


Figure 34. - PRESSION DE SATURATION DE LA VAPEUR D'EAU (millibar) en fonction de la température (degré centigrade)

Cette courbe montre clairement que plus la température est froide plus la tension d'équilibre de la vapeur d'eau est faible.

Deuxième mode:

Les gouttelettes d'un nuage n'ont pas toutes exactement la même température. L'atmosphère n'est pas un corps homogène et il s'y trouve des différences de température significatives. Entre les gouttelettes très rapprochées, ces différences peuvent être de l'ordre du centième ou même du dixième de degré. Or, comme en témoigne la figure 34 montrant la tension d'équilibre de la vapeur d'eau en fonction de la température, plus la température est basse, plus la tension d'équilibre est faible. Il s'ensuit que, suivant le principe énoncé, les gouttelettes les plus froides s'accroîtront au détriment des plus chaudes.

Troisième mode:

Les trois phases de l'eau peuvent être présentes dans un nuage même si ce nuage est à une température inférieure au point de congélation; c'est dire que dans l'air nuageux à une température plus basse que zéro degré C., il peut exister: (a) de la vapeur d'eau (phase gazeuse de l'eau), (b) des cristaux de glace (phase solide de l'eau) et (c) des gouttelettes d'eau surfondue (phase liquide). L'analyse des constituants d'un nuage a révélé, en effet, que l'existence de gouttelettes d'eau est possible jusqu'à des températures de -40 degrés C. Ces gouttelettes d'eau existant sous le point de congélation ont reçu le nom de "gouttelettes d'eau surfondue". La figure 35 montre comment la tension d'équilibre de la vapeur d'eau varie, en fonction de la température, en présence d'eau surfondue d'une part, et en présence de glace d'autre part. Si l'on consulte le graphique, on voit qu'à une même température, la tension

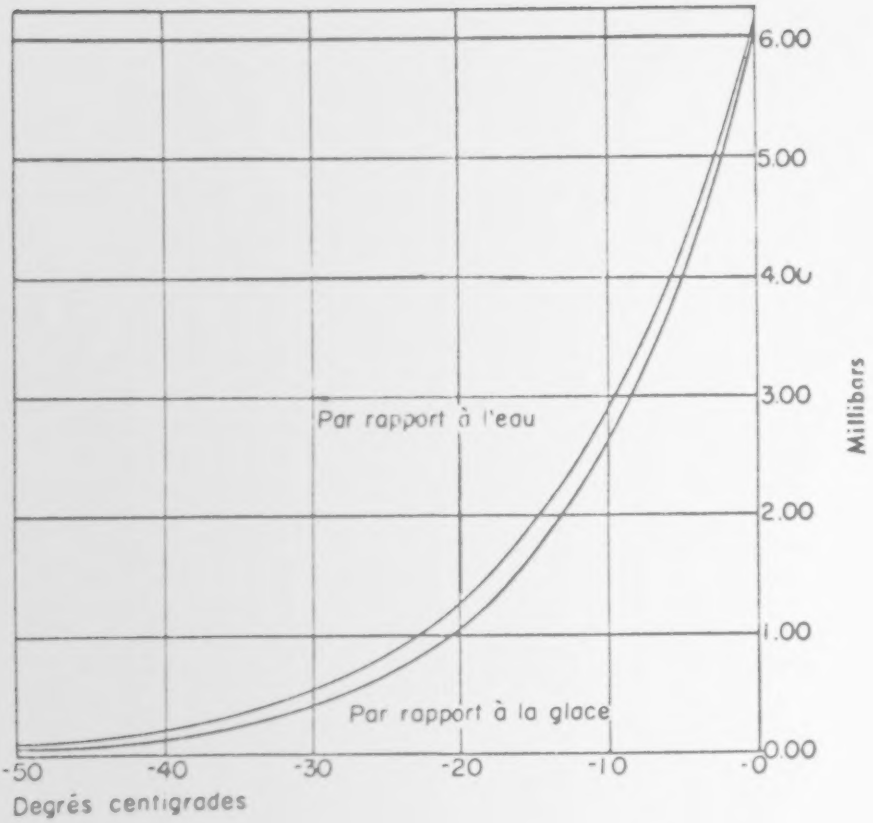


Figure 35. - PRESSION DE SATURATION DE LA VAPEUR D'EAU (millibar) en fonction de la température (degré centigrade)

La courbe de saturation par rapport à la glace est plus basse que celle se rapportant à l'eau. D'où la moindre tension d'équilibre pour le cas de la glace.

d'équilibre par rapport à la glace est beaucoup plus faible que par rapport à l'eau. On conçoit facilement que, dans un même nuage où sont présents des cristaux de glace et des gouttelettes d'eau surfondue, les cristaux de glace s'accroîtront au détriment des gouttelettes d'eau.

C) Coalescence

Le processus de condensation sélective de la vapeur d'eau produit, dans le nuage, des gouttelettes d'eau de différents poids, assez lourdes pour contrebalancer et vaincre les courants ascendants présents dans le nuage. Il y a chute relative ou vraie des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace dont la masse est suffisamment grande. Un autre processus peut alors intervenir. La chute relative ou vraie de la grosse gouttelette ou du cristal se fait dans un nuage de fines gouttelettes. Il y a nécessairement collisions entre les divers éléments du nuage. Ces collisions produisent l'agglomération des fines gouttelettes à la grosse gouttelette ou au cristal: c'est le processus de coalescence illustré en figure 36.

Les gouttelettes d'eau d'un nuage peuvent donc accroître leurs masses de quatre façons. Il y aurait encore d'autres facteurs de croissance, comme la charge électrique des gouttelettes, leur force d'attraction hydrodynamique, etc., mais nous avons mentionné les plus importants.

D) Importance relative des mécanismes d'accroissement

De ces quatre processus d'accroissement, quels sont les plus

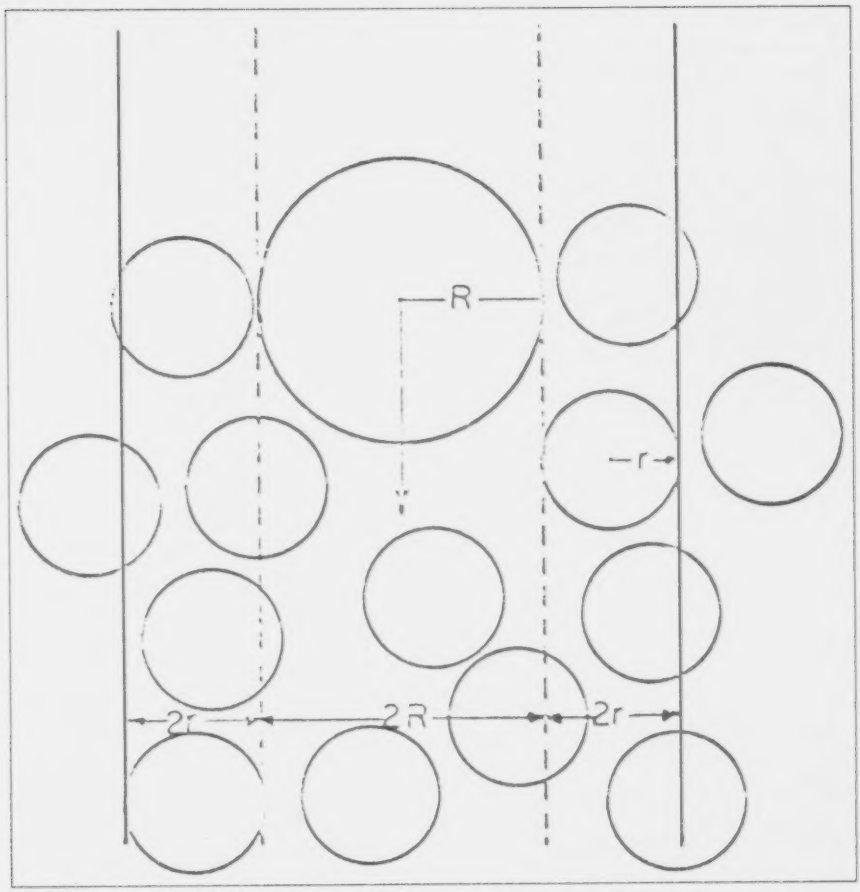


Figure 36. - PRINCIPE DE LA COALESCENCE

La grosse goutte de rayon R pourra entrer en collision avec toutes les gouttelettes de rayon r qu'elle rencontrera et qui seront comprises dans le cylindre de rayon (R + 2r). Les collisions résulteront en une agglomération de plus petites gouttelettes à la plus grosse. C'est là l'essentiel du principe.

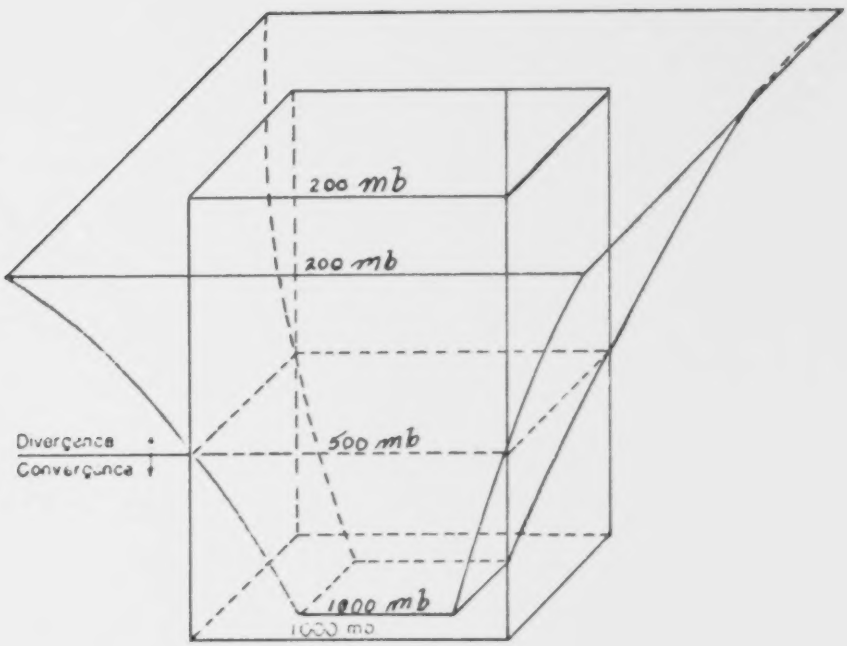


Figure 37. - DEFORMATION que subit une COLONNE D'AIR sous l'effet de la divergence et de la convergence

Le prisme représente le volume initial et le volume ombré, le volume final. La zone de convergence se situe ordinairement entre la surface (1,000 millibars ou mb.) et le niveau de 20,000 pieds (500 mb.). La zone de divergence est en haut de 20,000 pieds et s'étend jusqu'à 50,000 pieds soit le niveau de la tropopause (200 mb.). Il y a contraction de volume dans les basses couches de l'atmosphère et dilatation dans les couches élevées.

importants? Diverses théories ont cours. Cependant, toutes sont d'accord pour donner une première importance au mécanisme de condensation au début de la croissance des gouttelettes, alors que le mécanisme de coalescence ne devient efficace que lorsque les gouttelettes ont atteint une certaine masse. Dans toutes ces théories, les seules différences viennent du choix du processus considéré comme le plus important mécanisme de condensation. Sous nos latitudes, la théorie la plus généralement admise pour la formation de la pluie est celle de Bergeron-Findeisen. Cette théorie suppose que le nuage producteur de pluie ou de neige doit d'abord passer par le stade de nuage mixte, c'est-à-dire qu'il doit nécessairement être constitué de gouttelettes d'eau surfondue et de cristaux de glace. C'est donc dire qu'au moins une partie des nuages doit se trouver à des températures inférieures au point de congélation. Sous nos latitudes, ceci est possible en été comme en hiver, puisque le niveau de température de zéro degré C. ne dépasse jamais les 15,000 pieds et que le sommet des nuages producteurs de pluie se situe ordinairement entre 20,000 et 40,000 pieds au-dessus du niveau de la mer. Cependant, dans les régions équatoriales où les nuages producteurs de pluie ont des températures ordinairement supérieures au point de congélation, il faut alors donner la préséance à d'autres processus de condensation.

E) Apport d'humidité

Il faut maintenant tenir compte du fait qu'un nuage peut donner jusqu'à deux, trois et même cinq pouces de pluie sans paraître visiblement changé. C'est un mécanisme d'accumulation d'humidité qui est responsable du phénomène. Pour la formation du nuage, il a fallu un bon

courant ascendant vertical pour permettre à l'air de se refroidir et provoquer ainsi la condensation. Ce mécanisme d'ascension de l'air doit nécessairement se continuer si l'on veut que le nuage persiste. Cependant, l'ascension de l'air provoque un vide qui est immédiatement comblé par l'air avoisinant. Le processus d'ascension continue toujours et on se trouve donc en présence d'un apport horizontal et ininterrompu d'humidité. C'est ce qu'on appelle la "convergence".

A cette convergence de l'air et de l'humidité en surface correspond un phénomène contraire en altitude. L'air qui monte continuellement trouve place en repoussant l'air qui s'y trouve déjà; il y a donc un courant horizontal d'éloignement de l'air appelé "divergence". La figure 37 montre les modifications que subit une colonne d'air au cours d'une averse. Plus ces modifications sont grandes, plus la précipitation est abondante; plus elles sont rapides, plus la précipitation est intense.

Il y a chute de neige si l'air où tombe la précipitation est au-dessous ou tout près du point de congélation, c'est-à-dire si l'air n'est pas assez chaud pour permettre aux cristaux de glace de fondre complètement. Il y a chute de pluie si l'air où se forme la précipitation se trouve au-dessus du point de congélation. Enfin, il y a chute de grêle si les mouvements ascendants et la convergence sont assez forts pour permettre la formation de grêlons qui peuvent difficilement fondre dans les 10 à 15 milles pieds qui les séparent de leur niveau de congélation à celui de la surface terrestre.

V - SOMMAIRE ET CONCLUSIONS

Le poète trouve souvent son inspiration dans les formes et les couleurs des nuages. Le cultivateur regarde les nuages quelquefois avec colère, en songeant aux récoltes perdues par la grêle, les pluies ou les vents qu'ils ont apportés. Le citadin les admire en se rappelant les joies de vacances en plein air. Le météorologue scrute également les nuages, mais avec les yeux d'un chercheur, et son intérêt n'en est pas moins vif. Il désire connaître leur provenance, identifier leurs formes, expliquer leur évolution et prédire leurs conséquences.

Si au moyen de ce bulletin nous avons pu faire naître chez le lecteur ce désir du météorologue, si nous l'avons intéressé au problème des nuages, tout au moins si nous avons dirigé son regard en même temps que son intérêt vers le firmament, nous sommes satisfaits et notre but est atteint. Les nuages capteront éventuellement son attention et leur observation éveillera sa curiosité.

VI - REFERENCES

1 - BRICARD, Jean, 1953. Physique des nuages. Les presses universitaires de France, Paris.

2 - COMITE METEOROLOGIQUE INTERNATIONAL, 1939. Atlas international des nuages et des types de ciels. Vol. I (Atlas général). Office national météorologique, Paris. 98 p. + 174 planches.

3 - DIEM, M., 1948. Messungen der Grösse von Wolkenelementen II Met. Rundschau I. p. 261.

4 - GAGNON, Raymond, 1966. La formation de la précipitation. Le Jeune Scientifique, mars 1966: 138-141.

5 - _____, 1966. La formation de la précipitation. Feuillet Météorologique, Vol. V (5): 108-113, mai 1966.

6 - LANDSBERG, Helmut, 1958. Physical Climatology. Gray Printing Co. Inc. DuBois, Penn. 446 p.

7 - MASON, B.J., 1957. The Physics of Clouds. The Clarendon Press. Oxford. 482 p.

8 - PERRIER, Raymond, 1965. La formation des nuages. Le Jeune Scientifique, décembre 1965: 60-65.

9 - _____, 1966. La formation des nuages. Feuillet Météorologique, Vol. V (2): 35-41, février 1966.

10 - _____, 1966. Les divers types de nuages. Feuillet Météorologique, Vol. V (4): 63-66, avril 1966.

11 - U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 1941. Cloud Forms According to the International System of Classification. Weather Bureau, Publ. No. 956 - Revised, Third Edition. 24 p.

12 - VILLENEUVE, G.-Oscar, 1951. Qu'est-ce qu'un nuage? Feuillet Météorologique (ministère des Terres et Forêts) Vol. II (9): 6-8.

13 - _____, 1952. Eléments de météorologie descriptive (Texte miméographié). 168 p. + 134 photos.

14 - _____, 1963. Observation de l'insolation, de la nébulosité, du vent et de quelques phénomènes oculaires. Bul. M-6. Service de Météorologie, ministère des Richesses naturelles, Québec. 44 p.

15 - _____, 1966. Les nuages. Feuillet Météorologique, Vol. V (9): 203-205, septembre 1966.

16 - WEICKMAN, H. and Aufm H.J. KAMPE, 1953. Physical Properties of Cumulus Clouds. Journal of Meteorology. 10, p. 204.